

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
ESCUELA DE POSGRADO



**ALTERNATIVA VERDE PARA LA FLOTACIÓN DE MINERALES
SULFURADOS DE COBRE MEDIANTE EL USO DE UN LÍQUIDO IÓNICO Y
REACTIVOS ORGÁNICOS NATURALES**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAGÍSTER EN
QUÍMICA**

AUTOR

Quim. RITA ALEXANDRA ARANA BAUTISTA

ASESOR:

Dra. EMMA PATRICIA MORALES BUENO

Julio, 2019

RESUMEN

El uso de los reactivos orgánicos naturales como colectores y/o depresores en la flotación de minerales se han reportado en los últimos años como reemplazo de un colector o depresor usado habitualmente en la flotación mineral, pero no se han usado estos reactivos en una misma flotación ni mucho menos para minerales peruanos. En el presente trabajo se propone la flotación de minerales sulfurados de cobre de tres minas ubicadas en el Perú, con reactivos orgánicos naturales (almidón, ácidos húmicos y quebracho) como colectores y depresores, además del peróxido de hidrógeno y un líquido iónico considerados como reactivos verdes. Los resultados muestran que los reactivos orgánicos naturales son muy eficientes como colectores y depresores de cobre y hierro respectivamente, resaltando los ácidos húmicos y fúlvicos como colectores respecto al almidón y el líquido iónico. El peróxido de hidrógeno actúa como depresor de pirita respecto al quebracho y almidón. La microflotación verde con el sistema ácidos húmicos y fúlvicos – peróxido de hidrógeno es la más eficiente, su principal ventaja es el alto % recuperación de cobre y la efectiva depresión del hierro como pirita. Además, el uso de estos reactivos tiene un menor impacto ambiental al ser los ácidos húmicos y fúlvicos residuos orgánicos que son descartados de diferentes industrias. Las interacciones existentes entre el mineral y los posibles reactivos de flotación se caracterizan mediante FT - IR y SEM - EDS. En comparación con la flotación convencional y tradicional, este nuevo método no solo evidencia un alto porcentaje de recuperación de cobre y un mínimo % de recuperación de hierro, sino también se clasifica como flotación verde de acuerdo a la Estrella Verde.

Palabras clave: Flotación, microflotación, colector, depresor, química verde, FT – IR, micrografía.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a mi familia en especial a mi madre, mi pilar fundamental, por inculcarme la perseverancia y tenacidad para cumplir mis metas en la vida.

Agradezco la subvención brindada por CONCYTEC en el marco del convenio 231 – 2015 FONDECYT por haber financiado mis estudios de Maestría en Química.

Agradezco a la Dra. Patricia Morales mi asesora por su orientación, comprensión y dedicación en el desarrollo de mi investigación.

Agradezco a la Dra. Maribel Guzmán, coordinadora de la Sección Ingeniería de Minas de la por haberme orientado en los momentos que necesité apoyo, además de brindarme el ambiente necesario para el desarrollo de esta tesis. A la Quim. Claudia Toledo por la paciencia y motivación.

Agradezco también al Lic. Luis Cárcamo por haberme brindado los materiales necesarios para el desarrollo de esta tesis.

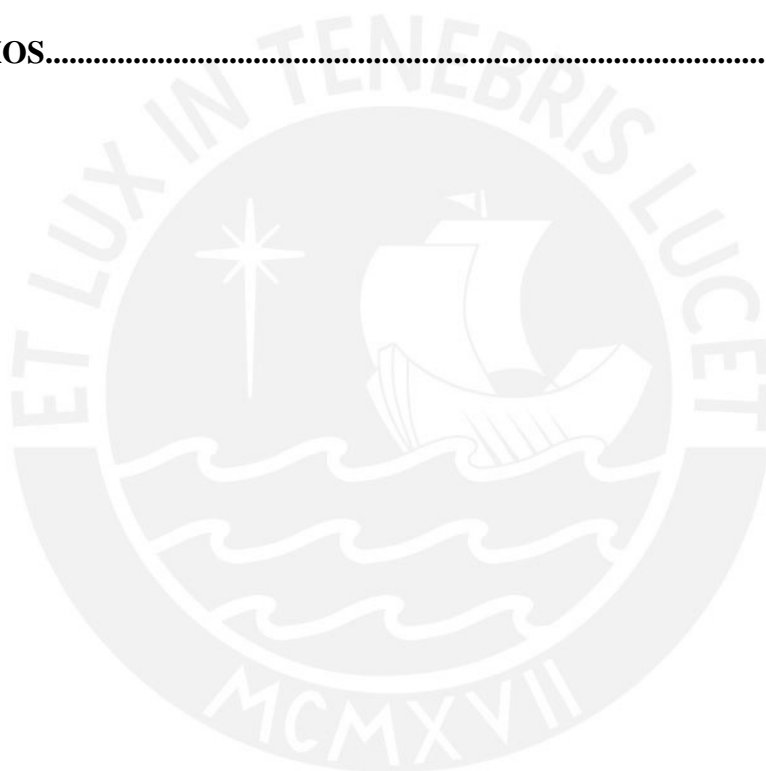
A mi mejor amigo y compañero Renzo R. por todo su apoyo, aliento y comprensión. A mis amigas Karen, Liz, Fátima y Yuly por todos sus consejos.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	14
4. APORTE Y RELEVANCIA DE LA INVESTIGACIÓN	15
5. OBJETIVOS.....	16
6. MARCO TEÓRICO	17
6.1. FLOTACIÓN.....	17
6.2. FACTORES FÍSICOS Y QUÍMICOS EN LA FLOTACIÓN DE MINERALES.....	17
6.3. REACTIVOS DE FLOTACIÓN.....	18
6.3.1. COLECTORES.....	18
A. COLECTORES ANIÓNICOS	18
B. COLECTORES CATIÓNICOS	18
6.3.2. ESPUMANTES	18
A. ESPUMANTES PARCIALMENTE SOLUBLES	19
B. ESPUMANTES SOLUBLES.....	19
6.3.3. REGULADORES - ACTIVADORES.....	19
6.3.4. DEPRESORES	19
6.3.5. REGULADORES DE PH.....	20
6.4. TEORÍA DE LA FLOTACIÓN	21
6.4.1. ADSORCIÓN FÍSICA.....	21
6.4.2. ADSORCIÓN QUÍMICA.....	21
6.4.3. CINÉTICA DE FLOTACIÓN	22
6.4.4. VARIABLES DE LA FLOTACIÓN MINERAL.....	23
GRANULOMETRÍA.....	23
DOSIFICACIÓN DE REACTIVOS	23
TIEMPO DE FLOTACIÓN.....	23
pH	23
6.5. QUÍMICA VERDE.....	24
6.5.1. PRINCIPIOS DE QUÍMICA VERDE.....	25
1. PREVENCIÓN DE RESIDUOS	25
2. ECONOMÍA ATÓMICA.....	26

3. METODOLOGÍAS DE SÍNTESIS DE TOXICIDAD REDUCIDA	27
4. DISEÑOS DE COMPUESTOS QUÍMICOS MÁS SEGUROS	27
5. DISMINUCIÓN DEL USO DE SUSTANCIAS AUXILIARES.....	27
6. EFICIENCIA ENERGÉTICA	27
7. USO DE MATERIAS PRIMAS RENOVABLES.....	27
8. REDUCCIÓN DE DERIVADOS	28
9. POTENCIACIÓN DE LA CATÁLISIS	28
10. DISEÑO DE PRODUCTOS BIODEGRADABLES.....	28
11. DESARROLLO DE TÉCNICAS PARA ANÁLISIS EN TIEMPO REAL	28
12. MINIMIZAR EL POTENCIAL DE ACCIDENTES QUÍMICOS	28
6.5.2. POLÍMEROS ORGÁNICOS.....	29
6.5.4. MÉTRICAS EN QUÍMICA VERDE	32
6.5.4.1. ESTRELLA VERDE (46).....	32
6.5.4.2. CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRELLA VERDE	34
7. METODOLOGÍA	40
7.1. CONDICIONES A EVALUAR EN LAS PRUEBAS DE FLOTACIÓN	40
7.2. REACTIVOS	40
7.3. EQUIPOS	41
7.4. ANÁLISIS PRELIMINARES	41
7.5. MICROFLOTACIÓN.....	42
7.5.1. MICROFLOTACIÓN ESTÁNDAR	42
7.5.2. EVALUACIÓN DE REACTIVOS.....	43
7.5.3. EVALUACIÓN DEL PROCESO DE FLOTACIÓN VERDE	45
7.5.4. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN	45
7.5.5. CARACTERIZACIÓN DE LAS MICROFLOTACIONES VERDES MEDIANTE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER (FT – IR) Y MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM) .	45
7.5.6. DETERMINACIÓN DEL CARÁCTER VERDE.....	46
8. RESULTADOS.....	47
8.1. ANÁLISIS PRELIMINARES	47
8.1.1. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA	47
8.1.2. MICROFLOTACIÓN.....	47
8.1.3. CARACTERIZACIÓN DE LA INTERACCIÓN COLECTOR, DEPRESOR CON LOS MINERALES.....	53
9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	66

9.1. MICROFLOTACIÓN VERDE.....	66
9.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS MICROFLOTACIONES VERDES	67
9.2.1. FT – IR.....	67
9.2.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO	71
9.2.3. POSIBLES INTERACCIONES ENTRE LOS COLECTORES Y DEPRESORES CON EL COBRE Y HIERRO DEL MINERAL SULFURADO	74
9.2.4. ESTRELLA VERDE	76
10. CONCLUSIONES	82
11. BIBLIOGRAFÍA	83
12. ANEXOS.....	88



TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los reactivos de flotación de acuerdo con su función (23)....	20
Tabla 2. Clasificación de los polímeros orgánicos usados en flotación mineral (38) ...	29
Tabla 3. Clasificación de los reactivos de flotación de acuerdo con su función (23)....	34
Tabla 4. Degradabilidad y renovabilidad de las sustancias involucradas (47)	36
Tabla 5. Criterio y puntaje para la construcción de la estrella verde (48)	37
Tabla 6. Minas de las muestras minerales y su ubicación	41
Tabla 7. Condiciones estándar de flotación	42
Tabla 8. Reactivos estándar de flotación	43
Tabla 9. Diseño experimental 2 ³	44
Tabla 10. Contenido de cobre y hierro de las muestras de mineral	47
Tabla 11. Condiciones y porcentaje de recuperación de cobre y hierro de las tres minas	48
Tabla 12. Evaluación de colectores – Las Bambas.....	49
Tabla 13. Evaluación de depresores – Las Bambas.....	50
Tabla 14. Evaluación de colectores - Chinalco	50
Tabla 15. Evaluación de depresores - Chinalco.....	51
Tabla 16. Evaluación de colectores - Condestable	52
Tabla 17. Evaluación de depresores – Condestable.....	53
Tabla 18. Condiciones de los reactivos de flotación con mejores resultados.....	66
Tabla 19. Condiciones de las microflotaciones verdes.....	67
Tabla 20. Porcentaje de recuperación de cobre y hierro de las tres minas	67
Tabla 21. Resumen del análisis por FT - IR del concentrado obtenido de las microflotaciones verde 1 de las tres minas	69
Tabla 22. Resumen del análisis por FT - IR del concentrado obtenido de las microflotaciones verde 2 de las tres minas	70
Tabla 23. Resumen del análisis por FT - IR del concentrado obtenido de las microflotaciones verde 3 de las tres minas	70
Tabla 24. Resumen del análisis por FT - IR del concentrado obtenido de las microflotaciones verde 4 de las tres minas	70
Tabla 25. Resumen del análisis EDS del concentrado obtenido de las microflotación verde 2 para las tres minas.....	74
Tabla 26. Comparación entre la flotación convencional y la flotación alternativa verde	77
Tabla 27. Peligros y puntuación correspondientes de los reactivos de flotación convencional.....	77
Tabla 28. Peligros y puntuación correspondientes de los reactivos de flotación – Alternativa verde	78
Tabla 29. Criterios y puntajes utilizados para construir la estrella verde para la microflotación – Alternativa verde.....	78
Tabla 30. Criterios y puntajes utilizados para construir la estrella verde para la flotación convencional.....	79

FIGURAS

Figura 1: Los doce principios de la química verde (33).....	25
Figura 2: Medidas de prevención y gestión de residuos según OECD (34)	26
Figura 3: Estructura del quebracho (38).....	30
Figura 4: Estrella verde (GSAI = 100) y estrella roja (GSAI = 0)	39
Figura 5: Tubo de Hallimond (58).....	42
Figura 6: Espectro FT - IR de interacción almidón - H ₂ O ₂ con el mineral Las Bambas	54
Figura 7: Espectro FT - IR de interacción almidón - quebracho con el mineral Las Bambas	54
Figura 8: Espectro FT-IR de interacción ácidos húmicos y fúlvicos - H ₂ O ₂ con el mineral Las Bambas	55
Figura 9: Espectro FT-IR de interacción ácidos húmicos y fúlvicos - quebracho con el mineral Las Bambas	55
Figura 10: Espectro FT-IR de interacción almidón - H ₂ O ₂ con el mineral Chinalco	56
Figura 11: Espectro FT-IR de interacción almidón - quebracho con el mineral Chinalco	56
Figura 12: Espectro FT-IR de interacción ácidos húmicos y fúlvicos - H ₂ O ₂ con el mineral Chinalco.....	57
Figura 13: Espectro FT-IR de interacción ácidos húmicos y fúlvicos - quebracho con el mineral Chinalco.....	57
Figura 14: Espectro FT-IR de interacción almidón - H ₂ O ₂ con el mineral Condestable	58
Figura 15: Espectro FT-IR de interacción almidón - quebracho con el mineral Condestable	58
Figura 16: Espectro FT-IR de interacción ácidos húmicos y fúlvicos - H ₂ O ₂ con el mineral Condestable	59
Figura 17: Espectro FT-IR de interacción ácidos húmicos y fúlvicos - quebracho con el mineral Condestable	59
Figura 18: Micrografía de microflotación verde 1	60
Figura 19: Micrografía de microflotación verde 2	60
Figura 20: Micrografía de microflotación verde 3	61
Figura 21: Micrografía de microflotación verde 4	61
Figura 22: Micrografía de microflotación verde 1	62
Figura 23: Micrografía de microflotación verde 2	62
Figura 24: Micrografía de microflotación verde 3	63
Figura 25: Micrografía de microflotación verde 4	63
Figura 26: Micrografía de microflotación verde 1	64
Figura 27: Micrografía de microflotación verde 2	64
Figura 28: Micrografía de microflotación verde 3	65
Figura 29: Micrografía de microflotación verde 4	65
Figura 30: EDS de la microflotación verde 2 - Las Bambas.....	71
Figura 31: EDS de la microflotación verde 2 - Chinalco	72
Figura 32: EDS de la microflotación verde 2 - Condestable.....	73
Figura 33: Estrella verde - Microflotación verde	80

Figura 34. Estrella verde - Flotación convencional.....	80
----------------------------------------------------------------	----

ANEXOS

Anexo 1. Diagrama de flujo de la Microflotación verde.....	88
Anexo 2. Espectro FT-IR experimental del 1-etil-3-metilimidazolio	90
Anexo 3. Espectro FT - IR experimental del almidón soluble	90
Anexo 4. Espectro FT-IR experimental del quebracho	91
Anexo 5. Espectro FT - IR experimental de los ácidos húmicos	91
Anexo 6. Espectro FT - IR experimental del peróxido de hidrógeno	92

ABREVIATURAS

LI	:	Líquido iónico
QV	:	Química Verde
GHS	:	Global Harmonized System
EV	:	Estrella verde
GSAI	:	Green Star Area Index
SDS	:	Safety Data Sheet
SEM	:	Scanning Electron Microscope
EDS	:	Energy Disperse Spectrometer
FT - IR	:	Fourier Transform Infrared

1. INTRODUCCIÓN

La minería en el Perú es uno de los sectores económicos más importantes, tiene una gran influencia en el desarrollo económico del país, alcanzando un 50 % de las exportaciones anuales al mercado extranjero, siendo los principales demandantes Estados Unidos, China, Suiza, Japón, Canadá y la Unión Europea. Perú ocupa uno de los primeros puestos en la producción de los principales minerales a nivel mundial y de América Latina, es el segundo productor de plata a nivel mundial, tercer productor mundial de cobre, primer productor de oro, zinc, estaño, plomo y molibdeno en América Latina (1).

Existe una diversidad de minerales en todo el territorio peruano que abre la posibilidad de explotación en diversos lugares, dependiendo del tipo de mineral a extraer los minerales pueden ser metálicos o no metálicos. En Perú los minerales metálicos son los más abundantes; tales como hierro, cobre, plomo, oro, plata, entre otros, los cuales son empleados como materias primas en la fabricación de todo de materiales para la industria; los minerales no metálicos (menos abundantes) son conocidos como materia rocosa o ganga (2). Todos los metales de importancia para la industria están en su mayoría unidos químicamente a otros formando una mena mineral que a su vez se encuentra mezclada con minerales no metálicos o ganga. Un mismo metal de interés se puede obtener o extraer de diferentes minerales, por ejemplo el cobre se puede extraer de la calcosina, bornita, calcopirita, cuprita y malaquita, en un yacimiento se puede encontrar a varios de estos minerales o uno solo. Asimismo, de una sola mena mineral se puede obtener más de un metal, por ejemplo de la calcopirita se obtiene cobre y plata por diferentes o similares tratamientos.

Una vez obtenido el mineral de interés mediante procesos extractivos, el mineral se somete a procesos de concentración gravimétricos o fisicoquímicos, la flotación es el proceso fisicoquímico más utilizado porque se obtiene mayor porcentaje de concentrado en menos tiempo. El objetivo de la flotación de mineral es separar los metales de interés para la industria de los metales o no metales presentes en un mismo mineral a partir de una modificación fisicoquímica de su superficie para que las burbujas de aire se adhieran a los metales de interés y asciendan a través de un sistema, esto se logra con la adición de reactivos químicos llamados colectores, estos son sustancias orgánicas con un parte de su estructura polar y otra no polar que genera superficies hidrofóbicas alrededor del metal de interés (2). La recuperación de un metal o de varios metales se puede controlar de acuerdo a la dosificación de los reactivos, pH y tiempo de acondicionamiento dentro del sistema de flotación.

Otro reactivo usado es el espumante el cual posibilita la formación de burbujas de aire y así mismo la adhesión de la partícula hidrófoba a esas burbujas de aire, para ser un buen espumante la adherencia al metal con el reactivo colector debe ser fuerte y estable, es decir la burbuja no se puede destruir tan rápido o tan despacio a la agitación dentro del sistema de flotación.

La principal ganga en los minerales peruanos es el óxido de hierro, por tanto, se usa un tercer reactivo conocido como depresor, cuya función es la contraria a un colector, debe deprimir la pirita y no convertirla en hidrofóbica (3).

Pese a que los colectores son selectivos el proceso de extracción de los metales sigue siendo algo deficiente, debido a la variedad de composición de los minerales y también a que la mayoría de reactivos usados contaminan el medio ambiente, no solo en la extracción sino también en su producción. Los colectores actualmente usados son los de tipo xantatos (xantatos, ésteres de xantato), carbamatos (ditiocarbamatos,

tritiocarbamatos), mercaptanos, mercaptobenzotiazol y los derivados orgánicos del ácido fosfórico o del fósforo (ditiofosfatos, tiofosfatos, ácido dialquilditiofosfórico), que provienen de bisulfuro de carbono, solventes, pentasulfuro de fósforo. En su producción se obtienen productos secundarios como sulfuro de hidrógeno, sulfhidrato de sodio, que son agresivos ambientalmente (4). Por tanto, el nuevo desafío en la concentración de minerales es obtener reactivos de flotación que no perjudiquen el medio ambiente, tanto en su producción como en su uso.



2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existen estudios que reportan el uso de líquidos iónicos como colectores, como el de la flotación de cuarzo usando TOMAS (trioctilmetilamonio salicilato) (5), en los que se obtuvo un alto grado de concentración del metal de importancia.

Además, existen estudios respecto al uso de diferentes tipos de materia orgánica como colectores y/o depresores de minerales sulfurados. Esta materia orgánica puede ser polielectrolitos y ácidos orgánicos de alto peso molecular, presentando muchos grupos funcionales (carboxílico, hidroxilo, fenólico, aromático, estructuras de quinona, nitrógeno, diversos anillos aromáticos y ácidos alifáticos débiles) que varían en forma y estructura dependiendo de las condiciones ambientales. Presentan una gran actividad superficial y tienen propiedades dispersantes y floculantes (6, 7).

Algunos estudios han informado sobre el efecto depresor de los ácidos húmicos y fúlvicos en la flotación de molibdenita (8, 9). Además, se reportan los efectos depresores de otros compuestos orgánicos tales como lignosulfonato, dextrina, aceite de sulfato de coco, bacterias y almidón en flotación de minerales de cobre y molibdeno (10-13). La dextrina deprime la galena en el rango de pH de 10-12, mientras que la esfalerita está deprimida solo alrededor de pH 7,5 (14). La acción depresora de la dextrina disminuye al aumentar el pH de la esfalerita, lo que facilita su separación selectiva de la galena (15).

3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Con el desarrollo de la química verde se presenta una alternativa a todos los reactivos convencionalmente usados en la flotación. Para los colectores los líquidos iónicos constituyen una opción interesante, ellos poseen baja volatilidad y alta temperatura de ionización, se usan como catalizadores de transferencia de fase, disolventes, lubricantes, agentes captadores de gases, materiales de revestimiento, también se pueden usar como modificadores de pH y espumantes; sin embargo, la literatura relacionada con la aplicación de líquidos iónicos en la flotación mineral es escasa. Existen estudios del uso de líquidos iónicos en la flotación de cuarzo a partir de minerales de hierro de bajo grado, pero no sobre minerales sulfurados.

El depresor actualmente usado es el NaCN, altamente contaminante para el medio ambiente e incluso puede causar la muerte al ser humano por un inadecuado manejo. La alternativa propuesta es el uso de reactivos orgánicos naturales como quebracho, lignina, dextrina, mezclados con peróxido de hidrógeno, calificado este último como reactivo verde. Existen diversos estudios de estos reactivos y de peróxido de hidrógeno como depresores, pero no llegan a ser conclusivos, además no existen estudios usando los reactivos verdes propuestos en una misma flotación, para la obtención de un 'proceso verde'.

Es necesario discutir los posibles mecanismos de interacción de los reactivos alternativos para la flotación con la superficie de los minerales de sulfuro. Con todo lo presentado, ¿se obtendrá porcentajes superiores de recuperación del metal deseado usando los reactivos propuestos para la flotación de minerales, respecto a los reactivos usados convencionalmente? ¿En qué medida los líquidos iónicos serán útiles en la flotación de minerales? ¿Qué tipo de interacciones se presentan

entre los reactivos propuestos y los minerales peruanos? Finalmente, ¿en qué medida el proceso a proponer podrá ser llamado verde?

4. APORTE Y RELEVANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

Ecológicamente hablando, la aplicación de los líquidos iónicos, polímeros naturales, ácidos húmicos y fúlvicos como colectores, así como polímeros naturales y peróxido de hidrógeno como depresores en la industria extractiva promete grandes posibilidades de recuperación de valores metálicos, además de tener un impacto económico relevante para la industria minera.

Dado que existe contaminación ambiental de los reactivos usados en la extracción de los minerales (flotación), no solo en el proceso sino también en su producción, se han reportado alternativas atractivas como el uso de los líquidos iónicos, para mitigar esta contaminación ambiental. Sin embargo, la literatura relacionada con la aplicación de líquidos iónicos en la flotación de minerales es escasa. Por tanto, se realizará un estudio usando líquidos iónicos en la concentración de minerales sulfurados, así como el estudio de reactivos orgánicos naturales y peróxido de hidrógeno.

5. OBJETIVOS

a. OBJETIVO GENERAL

Evaluar los reactivos orgánicos naturales en el proceso de flotación de minerales sulfurados.

b. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar los reactivos orgánicos naturales útiles en la flotación de minerales.
- Optimizar las condiciones para el uso de reactivos orgánicos naturales en la flotación de minerales.
- Comparar los resultados de recuperación en la flotación de minerales obtenidos por el método tradicional y el método propuesto.
- Determinar las interacciones entre los colectores y el mineral, mediante FT-IR, SEM-EDS.
- Evaluar el carácter verde del proceso de flotación tradicional y el método propuesto mediante la herramienta Estrella Verde.

6. MARCO TEÓRICO

6.1. FLOTACIÓN

Es un proceso fisicoquímico de modificación de tensión superficial que separa los metales de interés de otros minerales metálicos o no metálicos como los que componen la mayor parte de la roca original como la sílice. Durante la flotación, las burbujas de aire se adhieren superficialmente al mineral finamente molido, este sistema burbuja – mineral asciende en la celda de flotación, obteniendo una separación de los metales de la ganga mineral. La adhesión entre el mineral y las burbujas de aire depende de las propiedades hidrofílicas (afinidad con el agua) y aerofílicas (afinidad con el aire) del mineral (16).

6.2. FACTORES FÍSICOS Y QUÍMICOS EN LA FLOTACIÓN DE MINERALES

Los Factores químicos, son los involucrados en la química superficial de las tres fases que existen en un sistema de flotación: sólido, líquido y gas. La química superficial comprende los reactivos de flotación, colectores, depresores, espumantes, activadores y modificadores de pH, usados en el sistema además de la química de los minerales. Los Factores físicos, son la celda de flotación y los componentes operacionales, velocidad de alimentación de los reactivos químicos, mineralogía, tamaño de partícula (17).

6.3. REACTIVOS DE FLOTACIÓN

6.3.1. COLECTORES

La mayoría de los minerales son hidrofílicos lo cual dificulta su separación en una celda de flotación, para poder separarlos su superficie debe ser transformada de manera selectiva en hidrofóbica. Esto se logra adicionando reactivos colectores que transformen la superficie del mineral en hidrófoba o simplemente se adhieran al mineral por su parte polar dejando su parte apolar para que se adhieran a las burbujas de aire (18-20). Existen diversos tipos de colectores que pueden ser usados en un sistema de flotación.

A. COLECTORES ANIÓNICOS

Estos colectores se disocian de modo que sus radicales junto con el grupo polar constituyen un anión, dejando en la solución un catión que puede ser sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{+2}) o hidrógeno (18-20).

B. COLECTORES CATIÓNICOS

Son colectores derivados del amoníaco, con hidrógenos reemplazados por radicales (18-20).

6.3.2. ESPUMANTES

Son reactivos químicos que alteran la tensión superficial de líquidos. El objetivo principal es producir burbujas fuertes, resistentes y estables a la agitación y movimiento dentro de la celda de flotación, para que se adhiera al mineral de interés formando una espuma y separándolo de la ganga (18-20).

La mayoría de los espumantes usados en la industria de la flotación contienen alcoholes como el Metil Isobutil Carbinol (MIBC), aceite de pino, propilenglicol, polipropilenglicol, entre otros.

A. ESPUMANTES PARCIALMENTE SOLUBLES

a. ALCOHOLES ALIFÁTICOS

Son mezclas de alcoholes de cadena corta C6 a C8. El espumante más conocido y usado en gran volumen es el Metil Isobutil Carbinol (MIBC). A continuación, se presentan algunas mezclas de alcoholes más usadas en los sistemas de flotación:

- Mezclas de alcoholes C6 a C9, de peso específico 0,856; viscosidad 5 cps, baja solubilidad de agua y más selectivos que el MIBC.
- Mezclas de alcoholes C4 a C7 y aceite hidrocarbonado, son líquidos de color ámbar, peso específico 0,82; solubilidad en agua 5 g/L. Usado en la recuperación de cobre/molibdeno. Espuma menos persistente que la del MIBC
- Mezclas de alcoholes C5 a C8, peso específico 0,81; solubilidad en agua 10 g/L, punto de ignición 55 °C, producen espuma más consistente que el MIBC pero menos persistente que los propilenglicoles, aceite de pino y ácido cresílico.

B. ESPUMANTES SOLUBLES

a. ÉTERES POLIGLICOL

Estos espumantes son miscibles en agua esto asegura una alta difusión, además de la selectividad. Los propilenglicoles producen espumas estables y fuertes a la agitación en la celda de flotación. (21).

6.3.3. REGULADORES - ACTIVADORES

Sustancias que facilitan la adherencia de los colectores en la superficie de mineral (22).

6.3.4. DEPRESORES

Son reactivos de reacción inversa a los colectores, los depresores se utilizan para evitar la colección de otros minerales no deseados como la pirita presente en

abundancia en los minerales metálicos peruanos u otros metales presentes en los minerales que no se desean recuperar (22).

6.3.5. REGULADORES DE PH

Todos los minerales tienen un pH ideal de flotación, si el sistema de flotación no tiene el pH adecuado no se podrá recuperar el metal de interés. Los reguladores de pH son reactivos de flotación que ayudan a estabilizar la acidez de la pulpa proporcionando el ambiente adecuado para que el proceso de flotación se desarrolle con eficiencia (22).

Tabla 1. Clasificación de los reactivos de flotación de acuerdo con su función
(23)

Reactivo	Uso	Ejemplo
1. Colector	Mineral sulfurado	Xantato, aerofloat, dixantogenato
	Mineral oxidado	Ácidos grasos, aminas grasas
	Mineral no polar	Aceites
2. Espumante	Espumante general	Alcoholes, terpenol
	Espumante con capacidad colectora	Piridina, ácidos grasos
3. Regulador	Activador	Sales metálicas, ácidos inorgánicos, álcali orgánico y compuestos inorgánicos
	Depresor	
	Regulador de pH	Ácidos inorgánicos, álcali
	Floculante y dispersante	Ácidos inorgánicos, álcali, sales y polímeros

6.4. TEORÍA DE LA FLOTACIÓN

La flotación mineral ocurre porque los reactivos colectores se adsorben en la superficie del mineral de interés. En la interfase mineral - solución, los colectores pueden adsorberse en la superficie cuando se llega a una concentración de reactivo, esta concentración se denomina concentración micelar crítica (CMC) y se produce la asociación de las cadenas de carbonadas del colector. Por tanto, las micelas que se formaron ascienden en el sistema de flotación, saliendo de la pulpa. Existen dos tipos de adsorción del colector en la superficie mineral, la adsorción física y la adsorción química, electroquímica (24-26).

6.4.1. ADSORCIÓN FÍSICA

La adsorción física del colector en la superficie del mineral de interés ocurre por interacciones electrostáticas. El fenómeno que se lleva a cabo en esa interacción es la formación de la doble capa eléctrica. En una partícula de mineral en contacto con un líquido, se desarrolla una carga eléctrica superficial que se compensa por una distribución equivalente de carga en la fase acuosa (Capa de Stern). Entre la capa de Stern y el líquido se forma una capa difusa de contraiones. Ambas capas en conjunto son la doble capa eléctrica, que es importante en la adsorción de los reactivos colectores sobre la superficie de los minerales (24 – 26).

6.4.2. ADSORCIÓN QUÍMICA

En un sistema de flotación la adsorción de los reactivos colectores es importante para la recuperación del mineral de interés, además de la presencia de oxígeno en la celda de flotación, todo esto se puede explicar mediante la teoría química de la flotación mineral.

MECANISMO DE ADSORCIÓN QUÍMICA

1. Oxidación superficial debida a la presencia de oxígeno.
2. Formación de sales metálicas por intercambio iónico en la superficie del mineral. La solubilidad de estas sales depende del ion metálico y del colector. Si la solubilidad es baja son de difícil remoción de la superficie de minerales sulfurados de ese elemento y, por el contrario, si presentan solubilidad alta son de fácil remoción de la superficie de minerales sulfurados de ese elemento (26-28).

6.4.3. CINÉTICA DE FLOTACIÓN

La cinética de flotación estudia la variación del producto de recuperación de la espuma con el tiempo de flotación y el porcentaje de recuperación.

Aunque se han desarrollado los fundamentos de los modelos de cinética de primer orden, la información detallada sobre los factores que afectan la cinética de flotación aún no se ha obtenido con exactitud. Además, la influencia de factores químicos sobre la cinética de flotación, como el pH, el contenido de sólidos, la química del agua y el colector de dosis, se ha investigado poco. Por lo tanto, los problemas restantes no solo incluyen el efecto de factores químicos (pH, contenido sólido, química del agua y tipo de reactivo), velocidad del flujo de aire y velocidad del impulsor, en los parámetros de los modelos de flotación, sino también la flotación modelo en sí. Los modelos cinéticos comunes aplicados al proceso de flotación son de primer orden (ver ecuación 4) y se validan sobre la base del análisis experimental (28).

$$C(t) = C_0 e^{-Kt} \quad (4)$$

Considerando que la recuperación (R) a un cierto tiempo t, corresponde a la razón entre los finos recuperados durante dicho tiempo y los finos iniciales en la celda (28):

$$R(t) = \frac{c_0 - c(t)}{c_0} \quad (5)$$

6.4.4. VARIABLES DE LA FLOTACIÓN MINERAL

GRANULOMETRÍA

En muchos minerales los metales de interés están íntimamente asociados unos a otros, además de estar asociados con la ganga siendo el tamaño de partícula óptimo aquel donde la partícula representa a una sola especie mineralógica, facilitando la adhesión partícula/burbuja (29).

DOSIFICACIÓN DE REACTIVOS

La cantidad y el orden de adición de los reactivos de flotación dependen del tipo de mineral y su asociación mineralógica, además de sus propias características (grupos polares activos) (29-30).

TIEMPO DE FLOTACIÓN

El tiempo de flotación depende de las características del material que se va a flotar y de la conjugación de los demás factores que inciden en el proceso. El tiempo óptimo se determina mediante ensayos múltiples y estudios cinéticos (30, 31).

pH

Es la variable de control más usada en el proceso de flotación porque de ella depende en gran medida la recuperación y selectividad. El proceso de flotación es sumamente sensible a la variación de este parámetro. Existen valores de pH de

flotación para cada tipo de mineral a flotar, pero esos pueden variar con la dosificación de los reactivos de flotación (30, 31).

AIREACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE LA PULPA

El tiempo de acondicionamiento es una variable importante, porque es el tiempo necesario para que actúen en forma eficiente los reactivos de flotación. Algunos reactivos de flotación pueden presentar cinética de adsorción lenta por lo que necesitan un mayor tiempo de acondicionamiento, estos pueden ser agregados en la molienda, mientras que los reactivos con una cinética media o alta de adsorción pueden ser agregados directamente a la celda de flotación (30, 31).

6.5. QUÍMICA VERDE

El término Química Verde fue desarrollado por los profesores P. Anastas y J.C. Warner en su libro “*Green Chemistry: Theory and Practice*”.

Se define como la creación, desarrollo y aplicación de productos y procesos químicos para reducir o eliminar el uso y la generación de sustancias peligrosas. Esta propuesta plantea 12 principios (figura 1), que son una guía para saber si un proceso o sustancia es de carácter verde, es decir si son sostenibles o contaminantes para el medio ambiente (33).

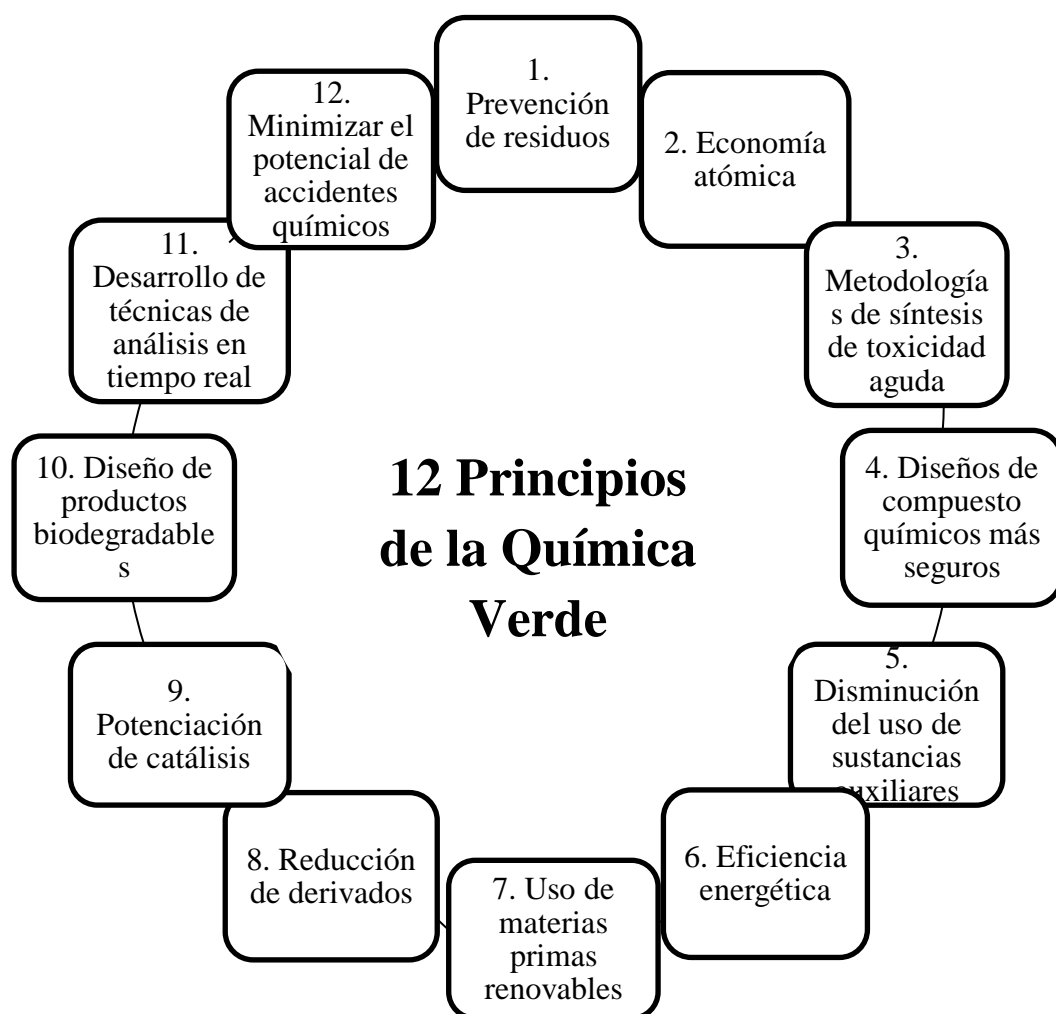


Figura 1: Los doce principios de la química verde (33)

6.5.1. PRINCIPIOS DE QUÍMICA VERDE

La figura 1 muestra los doce principios de la QV propuestos por Anastas y Warner (33).

1. PREVENCIÓN DE RESIDUOS

Es mejor evitar obtener residuos que eliminarlos ya que la eliminación involucra costos de tratamiento si son muy tóxicos, eliminación después del tratamiento (34) (ver figura 2).

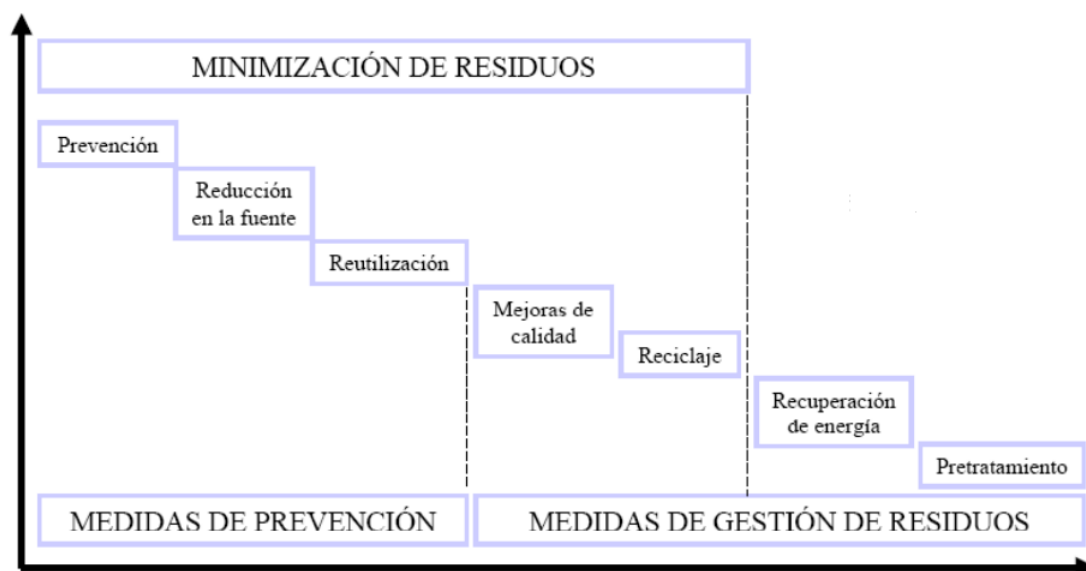


Figura 2: Medidas de prevención y gestión de residuos según OECD (34)

2. ECONOMÍA ATÓMICA

Al desarrollar procesos químicos, los químicos por razones obvias se enfocan principalmente en maximizar la selectividad y el rendimiento. En los últimos años, otra variable que algunos químicos han estado considerando es la economía atómica. Este término, introducido por primera vez por Barry Trost, fue un intento de impulsar a los químicos orgánicos sintéticos a buscar una "química más ecológica". En pocas palabras, la economía del átomo es un cálculo de la cantidad de reactivos que quedan en el producto final.

El método para calcular la economía del átomo se mantiene deliberadamente simple al hacer ciertas suposiciones clave, ignorando el rendimiento de la reacción y los excesos molares de los reactivos. Tampoco cuenta para solventes y reactivos (44).

3. METODOLOGÍAS DE SÍNTESIS DE TOXICIDAD REDUCIDA

Se debe investigar y hacer en la medida de lo posible nuevas de síntesis y/o preparación donde se usen sustancias con muy poca o ninguna toxicidad para para la salud humana y el medioambiente (33).

4. DISEÑOS DE COMPUESTOS QUÍMICOS MÁS SEGUROS

Se deben diseñar productos químicos eficientes con un mínimo o ninguna toxicidad (33).

5. DISMINUCIÓN DEL USO DE SUSTANCIAS AUXILIARES

Se debe evitar en la medida de lo posible el uso de sustancias auxiliares como son los solventes, agentes de separación. Si no se pueden dejar de usar deberían ser inocuos a todo sistema vivo (33).

6. EFICIENCIA ENERGÉTICA

Se deben minimizar el uso de energía, se prefieren los métodos que son a temperatura ambiente y presión atmosférica (33).

7. USO DE MATERIAS PRIMAS RENOVABLES

Las materias primas para la elaboración de productos deben en la medida de lo posible renovables o recuperadas por tratamientos inocuos. Varios tipos de industrias han cambiado los métodos de preparación de sus productos para minimizar costos en la producción, mediante el uso de materias primas renovables, usan técnicas de purificación, reflujo, decantación entre otras (33, 35).

8. REDUCCIÓN DE DERIVADOS

Las etapas intermedias de los procesos deben ser evitados, existen empresas que tratan de obtener sus productos sin alterar su eficiencia como producto, en una sola etapa (33).

9. POTENCIACIÓN DE LA CATÁLISIS

Se recomienda usar catalizadores selectivos para acelerar la reacción, ahorrando tiempo y energía (33).

10. DISEÑO DE PRODUCTOS BIODEGRADABLES

Se deben diseñar productos químicos que al finalizar su función se degraden de manera natural (33).

11. DESARROLLO DE TÉCNICAS PARA ANÁLISIS EN TIEMPO REAL

Se deben desarrollar metodologías de análisis para controlar los procesos en tiempo real evitando la formación de sustancias peligrosas (33). En industrias de consumo masivo usan técnicas en la línea de producción como FT-IR, FRX, entre otras, para evitar la formación de productos indeseables, que no puedan ser reprocesados después, o productos peligrosos (35).

12. MINIMIZAR EL POTENCIAL DE ACCIDENTES QUÍMICOS

Toda la materia prima, equipos deben ser diseñados de manera que ninguno de ellos sea riesgoso para el ser humano y/o el medio ambiente. Actualmente, las industrias reemplazan sus productos peligrosos con productos más amigables al medio ambiente y al ser humano sin alterar la eficiencia del producto final (33).

Todas las industrias buscan maneras de prevenir accidentes de todo tipo en especial accidentes químicos, existen la ley peruana N°29783 (37).

6.5.2. POLÍMEROS ORGÁNICOS

Existe una variedad de polímeros orgánicos que se han propuesto como reactivos en la flotación de minerales oxidados y sulfurados, en la Tabla 2 se presenta la clasificación por su grupo activo (38).

Tabla 2. Clasificación de los polímeros orgánicos usados en flotación mineral
(38)

Grupo	Polímero	Grupo activo polar
Polímeros no iónicos	Almidón	-OH, =CO
	Dextrina	
	Goma arábica	
	Derivados de taninos	
	Oxixelulosa	
Polímeros catiónicos	Amina polivinil	-NH ₂ , =NH
	Poliamina sustituida	
	Ditiocarbamato	
	Etilen diamina	
	Piperazina	
Polímeros aniónicos	Carboximetil celulosa	-COOH, -SO ₃ H, -OSO ₃ H
	Ácidos algínicos	
	Goma guar	
	Poliacrilatos	
	Lignina sulfonato	

1. QUEBRACHO

El quebracho es un polímero orgánico que está constituido por una mezcla de ésteres del ácido digálico y glucosa.

Este polímero presenta actividad depresora selectiva en flotación de minerales sulfurados por adsorción de sus grupos hidrófilos sobre la superficie de los minerales sulfurados (Ver figura 3). Además, el quebracho no afecta el porcentaje de recuperación del metal lo que es importante en la minería (38).

Se reporta la alta reactividad con sales solubles de Cu^{2+} y Fe^{3+} aumentando el consumo proporcionalmente. Cuando se tiene Cu^{2+} en la pulpa, se mantiene fuerte depresión solo hasta pH 6,0 pero no sobre este nivel. Esto concuerda con el hecho de que el quebracho no forma complejos con el cobre en condiciones ácidas. A pH superiores a 6,0 los iones cúpricos, incluyendo los iones férricos, forman complejos de manera muy intensa con los anillos beta fenólicos del grupo OH, siendo el complejo de cobre relativamente soluble mientras que el complejo férrico es altamente insoluble. Por lo tanto, estos reactivos, además de flotación selectiva de no metálicos, tendrían aplicación en flotación selectiva de sulfuros minerales tales como Pb-Cu, Zn y en sus separaciones (S.M. Bulatovic 1999:4).

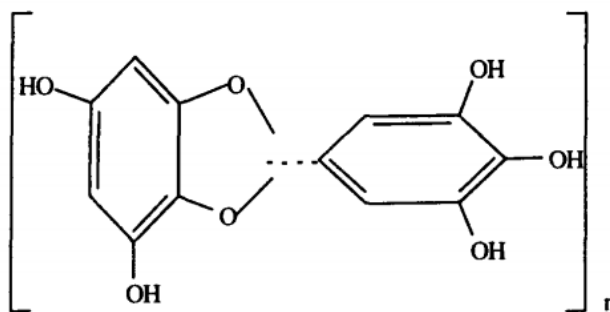


Figura 3. Estructura del quebracho (38)

2. BIOSÓLIDOS

Son residuos orgánicos sólidos, semisólidos o líquidos de diversas industrias. Algunos ejemplos se presentan a continuación, plantas de tratamiento de aguas residuales, lodos orgánicos, materia orgánica hidrosoluble de compost, lodos

industriales del tratamiento de residuos líquidos orgánicos industriales, materia orgánica hidrosoluble de vegetales, guano, estiércol, o una combinación de dos o más de cualquiera de los mismos. Los biosólidos se clasifican en dos tipos de ácidos llamados fúlvicos que son los componentes orgánicos presentes en la materia orgánica (biosólidos, estiércol), son obtenidos por una extracción de tipo básica y que no precipitan a pH bajo y los ácidos húmicos que son componentes orgánicos presentes en la materia orgánica y son obtenidos por una extracción de tipo básica y que precipitan a pH bajo (41).

3. LÍQUIDOS IÓNICOS

Los líquidos iónicos son sales orgánicas compuestas de cationes (orgánicos o inorgánicos) y aniones que presentan un punto de fusión cercano a la temperatura ambiente, por lo tanto son líquidos a temperatura ambiente de ahí su nombre. En general, un líquido iónico tiene cationes del tipo 1,3-dialquilimidazolio o N-alquilpiridinio y un anión no coordinante. Entre los aniones más comunes se tienen: Cl^- , Br^- , PF_6^- , BF_4^- , OTf^- , MeSO_4^- , NO_3^- , SCN^- , HSO_4^- (42).

PROPIEDADES DE LOS LÍQUIDOS IÓNICOS (42)

- Son más densos que el agua. Su densidad varía de acuerdo a la longitud de la cadena carbonada del sustituyente del anillo imidazólico.
- Su viscosidad varía entre 10 y 1000 centipoise, esta varía de igual manera que su densidad, a medida que aumente la longitud de la cadena carbonada, también aumenta su viscosidad.

- Su temperatura de fusión varía desde - 90 °C hasta 200 °C. Por lo tanto, su presión de vapor es mínima, lo cual es importante ya que no son tóxicos al aire.
- Su presión de vapor es baja, por tanto se consideran no inflamables. Se consideran compuestos no inflamables.

6.5.4. MÉTRICAS EN QUÍMICA VERDE

Los doce principios de la química verde se pueden cuantificar, lo que es importante en la industria. Debido a ello, las microflotaciones fueron evaluadas mediante la Estrella Verde, esta métrica considera todo el proceso como un todo, fue desarrollada por un grupo de investigadores de la Universidad de Porto (Portugal), incluye la evaluación de los 12 principios de la química verde (49).

6.5.4.1. ESTRELLA VERDE (46)

Esta métrica mide qué tan verde es un proceso según el grado de cumplimiento de cada uno de los 12 principios de la química verde (QV) aplicables a los casos en evaluación, Los doce principios de QV son prescripciones cualitativas y deben considerarse juntas en la del evaluación del verdor, debido a que las alteraciones de las condiciones para la ejecución de las reacciones pueden tener diferentes consecuencias con respecto a los diferentes principios, el verdor puede mejorar con respecto a algunos de ellos, pero empeorar con respecto a otros.

La evaluación se da mediante la construcción de una estrella que tiene un número de picos igual al número de principios de la QV involucrados en el proceso. El grado verde se da mediante unos puntajes de acuerdo a las hojas de seguridad o MSDS de los reactivos químicos, en esa hoja se encuentran códigos del sistema

globalmente armonizado de clasificación y etiquetado (GHS, por *The globally harmonized system of classification and labelling of chemicals*).

Para construir la EV referente a una actividad experimental, se comienza por listar todas los reactivos químicos usados en la flotación tradicional y la propuesta, como son los colectores, depresores, espumantes, reguladores de pH. Para cada una de estas sustancias y/o materiales, se busca y ubica en su SDS los peligros para el ser humano y el medioambiente a través de la indicación de peligro (*hazard statements*) de los compuestos adoptados por el GHS, además de su degradabilidad. A partir de los códigos de la indicación de peligro y siguiendo criterios bien definidos, a cada sustancia/material se le asigna una puntuación de 1 si presenta peligro mínimo a 3 si presenta peligro máximo. Se califican también las sustancias/materiales de acuerdo con su degradabilidad y según sean o no materias primas renovables. Si no se encuentran estas informaciones requeridas para la construcción de la EV se asigna la máxima penalidad o puntuación (peligro máximo), esto se asigna como precaución. Finalmente, se calcula un valor numérico que expresa el área de la EV en forma relativa, como porcentaje de área verde de la estrella relativo al área de una estrella de verdor químico máximo, que ha sido llamado índice de área de la estrella verde (GSAI).

Para la estrella de verdor químico máximo, GSAI = 100, y para la de mínimo, GSAI = 0. (Ecuación 6)

$$GSAI = \frac{\text{Área de la estrella}}{\text{Área verde de la estrella de verdor químico máximo}} \times 100 \quad (6)$$

6.5.4.2. CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRELLA VERDE

Para realizar la construcción de la EV se debe revisar el procedimiento de microflotación e identificar cada etapa, acondicionamiento, preparación de los colectores, depresores, adición de los reactivos, etc. Después se realiza una lista de todas las sustancias involucradas, reactivos de flotación y también los desechos que quedan después de flotar un mineral. Los riesgos se evalúan a partir de los datos de la Hoja de Seguridad (SDS) de cada componente, así como su degradabilidad y renovabilidad (Tabla 4). En caso no se cuente con la información necesaria, se asigna el máximo valor en la penalización, esto es como precaución. En base a los datos obtenidos, se debe construir la EV para ambas flotaciones (tradicional y propuesta en esta tesis) tomando en cuenta los principios de la química verde (Tabla 5) (47).

Tabla 3. Clasificación de los reactivos de flotación de acuerdo con su función
(23)

Riesgos		Clasificación por código según riesgo	Puntaje
Salud	Toxicidad aguda, corrosión / irritación de la piel, daño ocular / irritación ocular, sensibilización respiratoria o cutánea, mutagenicidad de las células germinales, carcinogenicidad, toxicidad reproductiva,	H300, H301, H304, H310, H311, H314, H318, H330, H331, H334, H340, H341, H350, H351, H360, H361, H370, H371, H372, H373	3
	toxicidad específica para órganos diana, toxicidad por aspiración	H302, H303, H305, H312, H313, H315, H316, H317, H319, H320,	2

		H332, H333, H335, H336, H36	
		No se indica	1
Ambiente	Indicaciones adicionales de riesgo	EUH029, EUH031, EUH032, EUH070, EUH071, EUH201, EUH202, EUH206, EUH207	3
		EUH066, EUH201A, EUH203, EUH204, EUH205, EUH208	2
		No se indica	1
Físico	Toxicidad agua para el medio acuático y la capa de ozono	H400, H401, H410, H411, H420, EUH059	3
		H402, H412, H413	2
		No se indica	1
	Explosivos	H200, H201, H202, H203, H205	3
		H204	2
		No se indica	1
	Gases inflamables, aerosoles, líquidos, sólidos	H220, H222, H224, H225, H228 (categoría 1)	3
		H221, H223, H226, H227, H228 (categoría 2), H229	2
		No se indica	1
	Físicos		
		Gases químicos inestables	
		H230	3
		H231	2
		No se indica	1
		Gases oxidantes	
		H270	3
		No se indica	1
	Líquidos y sólidos oxidantes	H271, H272 (categoría 2)	3
		H272 (categoría 3)	2

	No se indica	1
Sustancias y mezclas autoreactivas, y peróxidos orgánicos	H240, H241, H242 (Tipo C & D)	3
	H242 (Tipo E & F)	2
	No se indica	1
Líquidos y sólidos pirofóricos	H250	3
	No se indica	1
Sustancias y mezclas autocalentables	H251	3
	H252	2
	No se indica	1
Sustancias o mezclas que en contacto con el agua emiten gases inflamables	H260, H261 (categoría 2)	3
	H261 (categoría 3)	2
	No se indica	1
Gases bajo presión	H280, H281	3
	No se indica	1
Sustancias y mezclas corrosivas para metales	H290	3
	No se indica	1
Declaraciones de peligros adicionales	EUH001, EUH006, EUH014, EUH018, EUH019, EUH044, EUH209	3
	EUH209A	2
	No se indica	1

Continúa

Tabla 4. Degradabilidad y renovabilidad de las sustancias involucradas (47)

Riesgo	Información de la sustancia	Puntaje
Degradabilidad	No degradable y no puede ser tratado para obtener sustancias degradables a productos inocuos	3
	No degradable, pero puede ser tratado para obtener sustancias degradables a productos inocuos	2

	Degradable y fragmentable en productos inocuos	1
Renovabilidad	No renovable	3
	Renovable	1

Tabla 5. Criterio y puntaje para la construcción de la estrella verde (48)

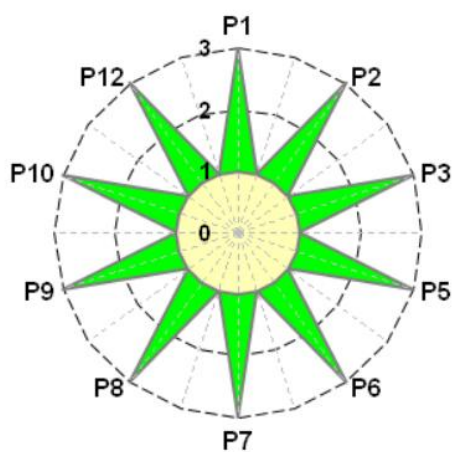
Principio	Criterio	Puntaje
P1- Prevención	El desecho es inocuo	3
	El desecho implica un riesgo moderado para la salud y el ambiente, para al menos una sustancia	2
	El desecho implica un alto riesgo para la salud y el ambiente, para al menos una sustancia	1
P2-Economía del átomo	Reacciones sin exceso de reactante (<10 %) y sin información de productos secundarios	3
	Reacciones sin exceso de reactante (<10 %) y con información de productos secundarios	2
	Reacciones sin exceso de reactante (>10 %) y sin información de productos secundarios	2
	Reacciones sin exceso de reactante (>10 %) y con información de productos secundarios	1
P3-Síntesis química menos peligrosa	Todas las sustancias involucradas son inocuas	3
	Sustancias involucradas tienen un riesgo moderado para la salud y el ambiente, para al menos una sustancia	2
	Al menos una sustancia implica un alto riesgo para la salud y el ambiente	1
P5-Solventes y sustancias auxiliares más seguras	No se usan solvente ni sustancias auxiliares, si se usan estos son inocuos	3
	Se usan solvente y/o sustancias auxiliares, pero	2

Continúa

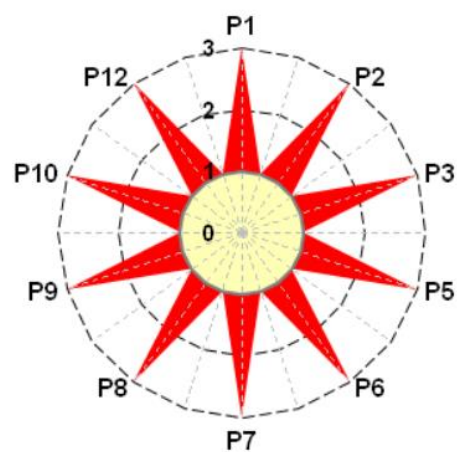
	tienen un riesgo moderado para la salud y el ambiente, para al menos una sustancia	
	Al menos un solvente o sustancia auxiliar tiene un alto riesgo para la salud y el ambiente	1
P6-Incremento de la eficiencia energética	Temperatura y presión ambiental	3
	Presión ambiental y temperatura entre 0°C y 100°C	2
	Presión diferente a la ambiental y/o T > 100°C o T < 0°C	1
P7- Uso de materia prima renovable	Todas las sustancias involucradas son renovables	3
	Al menos una sustancia involucrada es renovable, sin incluir el agua	2
	Ninguna sustancia involucrada es renovable, sin incluir el agua	1
P8-Reducir las derivatizaciones	No se usan derivatizaciones	3
	Solo se usa derivatización u operación similar	2
	Se usa más de una derivatización u operación similar	1
P9- Catalizadores	No se usan catalizadores, pero si se usan son inocuos	3
	Se usa catalizadores con riesgos moderados para la salud y el medio ambiente	2
	Se usa catalizadores con alto riesgo para la salud y el ambiente	1
P10-Diseño degradable	Todas las sustancias son degradables y fragmentan a productos inocuos	3
	Todas las sustancias son no degradables, pero pueden ser tratadas para obtener productos degradables en sustancias inocuas	2
	Al menos una sustancia no es degradable y no puede ser tratada obtener productos degradables en sustancias inocuas	1

Continúa

P12-Prevención de accidentes químicos	Sustancias usadas tienen un bajo riesgo para causar accidentes químicos	3
	Sustancias usadas tienen un riesgo moderado para causar accidentes químicos	2
	Sustancias usadas tienen un alto riesgo de causar accidentes químicos, para al menos una	1



GSAI = 100



GSAI = 0

Figura 4. Estrella verde (GSAI = 100) y estrella roja (GSAI = 0)

7. METODOLOGÍA

7.1. CONDICIONES A EVALUAR EN LAS PRUEBAS DE FLOTACIÓN

- Agitación intensa para mantener las partículas en suspensión.
- Tiempo de acondicionamiento de 1 – 12 min, con agitación, con reactivos en la pulpa y con/sin aire.
- Patrón de remoción de espuma estandarizado, a intervalos predefinidos, para garantizar reproducibilidad de los resultados.
- pH y temperatura a la que se realizan las pruebas.
- El tiempo de flotación
- Control del nivel de pulpa, agregando agua de reposición a igual pH y espumante.
- Concentración de los reactivos de flotación.

7.2. REACTIVOS

- 1-Etil-3-metilimidazolium tiocianato
- Quebracho
- Ácidos húmicos y fúlvicos
- Almidón
- Peróxido de hidrógeno
- Hidróxido de sodio
- Metilisobutilcarbinol (MIBC)
- 2 – etil hexanol
- Xantato isoamílico de potasio
- Cianuro de sodio

7.3. EQUIPOS

- Tubo de Hallimond
- Agitador magnético
- Estufa
- Balanza analítica
- Anemómetro

7.4. ANÁLISIS PRELIMINARES

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

El primer ensayo preliminar fue el análisis de las muestras minerales a ser flotadas, las cuales provenían de 3 minas de cobre distintas ubicadas en el Perú:

Tabla 6. Minas de las muestras minerales y su ubicación

Mina	Ubicación
Las Bambas	Apurímac
Condestable	Lima
Chinalco	Junín

Cada mineral fue analizado por Absorción Atómica para determinar la composición de Cu y Fe.

ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN REACTIVOS

Otro ensayo preliminar fue el análisis de composición de los reactivos de flotación, mediante FT – IR.

7.5. MICROFLOTACIÓN

Las pruebas de microflotación se realizaron en un tubo de Hallimond (Figura 7). A continuación, se presenta un esquema de la microflotación (ANEXO 1).

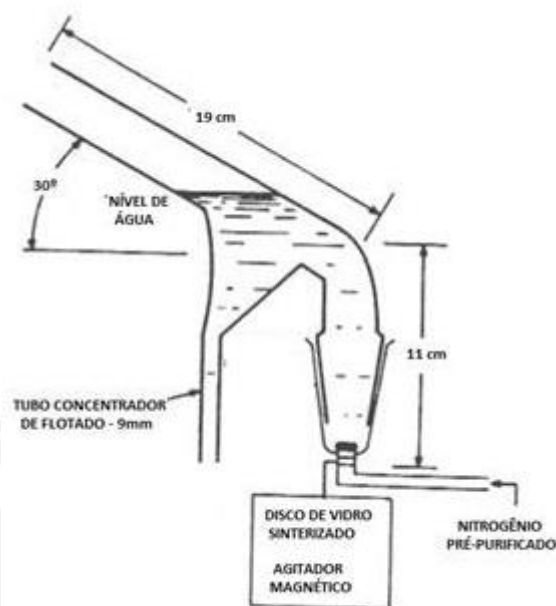


Figura 5. Tubo de Hallimond (58)

7.5.1. MICROFLOTACIÓN ESTÁNDAR

Se replicó las condiciones de flotación usadas habitualmente. Se realizó la microflotación estándar con los dos tipos de colectores xantato (éster del ácido xántico) y ditiofosfato, (Ver tablas 7 y 8).

Tabla 7. Condiciones estándar de flotación

Tiempo de acondicionamiento	10 min
Tiempo de flotación	1 min
Número de gotas	30
Cantidad de mineral	1 g
Agitación	500 rpm

Tabla 8. Reactivos estándar de flotación

Reactivo	Tipo	Cantidad (gotas)
Colector	Xantato 2 %	3
Espumante	MIBC	3
Depresor	NaCN 2 %	1
Regulador de pH	NaOH 0,5 N	10

7.5.2. EVALUACIÓN DE REACTIVOS

Los reactivos de flotación se evaluaron mediante un diseño experimental de 2^3 para estudiar simultáneamente todos los factores de interés, como dosificación de reactivo (X_1), tiempo de acondicionamiento (X_2) y agitación (X_3). La variable X_1 varía de 1 - 3 gotas, X_2 de 8 - 12 minutos y X_3 de 400 - 600 rpm.

Para determinar la significancia real de los efectos de las variables tomadas en consideración se realizó un análisis de varianza mediante la prueba F al 95 % de confiabilidad. Con todos los datos obtenidos se determinó el modelo matemático para cada reactivo de flotación, este modelo predice adecuadamente los valores observados y de los resultados obtenidos se realizó un análisis de residuos para conocer estadísticamente si el modelo matemático representa correctamente a los datos experimentales.

Tabla 9. Diseño experimental 2³

# Experimento	X ₁ (gotas)	X ₂ (min)	X ₃ (RPM)
1	1	8	400
2	3	8	400
3	1	12	400
4	3	12	400
5	1	8	600
6	3	8	600
7	1	12	600
8	3	12	600

1. COLECTORES

- LÍQUIDO IÓNICO

Se realizó la microflotación reemplazando el xantato por el líquido iónico. El líquido iónico es del tipo tiocianato y se agregó sin diluir.

- REACTIVOS ORGÁNICOS NATURALES

Se realizó la microflotación reemplazando el xantato y ditiofosfato por los reactivos orgánicos naturales (almidón y ácidos húmicos y fúlvicos) al 10 %.

2. DEPRESORES

- REACTIVOS ORGÁNICOS NATURALES

Los reactivos orgánicos naturales (quebracho y ácidos húmicos y fúlvicos) como depresores fueron evaluados con el colector estándar (xantato).

- **PERÓXIDO DE HIDRÓGENO**

El peróxido de hidrógeno como depresor fue evaluado con el colector estándar (xantato).

3. EVALUACIÓN DE REGULADORES

LÍQUIDO IÓNICO

El líquido iónico del tipo tiocianato se evaluó como regulador de pH.

7.5.3. EVALUACIÓN DEL PROCESO DE FLOTACIÓN VERDE

La flotación verde se realizó con los reactivos y a las condiciones que dieron mejores resultados.

7.5.4. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN

Las recuperaciones fueron medidas mediante espectroscopía de absorción atómica en el laboratorio de medio ambiente de la Facultad de Ingeniería de Minas de la PUCP.

7.5.5. CARACTERIZACIÓN DE LAS MICROFLOTACIONES VERDES MEDIANTE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER (FT – IR) Y MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

7.5.5.1. ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER (FT - IR)

La técnica de FT-IR permite conocer si los colectores o depresores se han adherido a la superficie mineral, esto se muestra mediante la aparición de señales características o desaparición de las mismas. El equipo utilizado fue el Perkin Elmer Spectrum 65, las muestras se analizaron mediante ATR (Reflectancia Total Atenuada).

7.5.5.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO -EDS

Las micrografías de los concentrados de cobre se obtuvieron en el SEM Philips S-505 y EDS (Espectrometría de Energía Dispersiva).

7.5.6. DETERMINACIÓN DEL CARÁCTER VERDE

Se construyó la Estrella Verde para la alternativa de flotación verde y la flotación convencional – tradicional.



8. RESULTADOS

8.1. ANÁLISIS PRELIMINARES

8.1.1. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

En la tabla 10 se presenta los resultados obtenidos para la composición de Cu y Fe en cada mineral, determinados por Absorción Atómica.

Tabla 10. Contenido de cobre y hierro de las muestras de mineral

Mineral	% Cu	% Fe
Las Bambas	84,6	22,3
Chinalco	83,1	25,6
Condestable	81,2	28,7

8.1.2. MICROFLOTACIÓN

MICROFLOTACIÓN CON LÍQUIDO IÓNICO

Se llevaron a cabo dos microflotaciones con el líquido iónico (LI), la primera usando a este como colector y la segunda como regulador. En la tabla 11 se presentan las condiciones y el porcentaje de recuperación de cobre como mineral principal y de hierro como ganga para cada mineral estudiado.

Tabla 11. Condiciones y porcentaje de recuperación de cobre y hierro de las tres minas

# Experi mento	Condiciones	Las Bambas		Chinalco		Condestable	
		% Cu	% Fe	% Cu	% Fe	% Cu	% Fe
1	Colector: IL Espumante: MIBC Depresor: NaCN	39,3	14,2	28,5	15,1	35,4	17,9
2	Colector: Xantato Espumante: MIBC - IL Depresor: NaCN	76,5	13,2	72,8	18,6	75,6	20,4

Se observa que el IL no actúa como colector, pero sí como un regulador en la flotación con los reactivos usados convencionalmente.

MICROFLOTACIONES CON REACTIVOS ORGÁNICOS NATURALES

La microflotación se realizó para cada muestra de mineral de acuerdo al diseño experimental (Tabla 9). El proceso se dividió por minas, se comenzó por Las Bambas seguido de Chinalco y finalmente Condestable.

MINA: LAS BAMBAS

a. COLECTORES

En las tablas 12 se presenta los resultados obtenidos para el porcentaje de cobre y hierro recuperados para cada colector ensayado, con la muestra de la mina Las Bambas.

Tabla 12. Evaluación de colectores – Las Bambas

# Experimento	Líquido iónico		Almidón		Ácidos húmicos	
	% Cu	% Fe	% Cu	% Fe	% Cu	% Fe
1	46,7	18,4	72,3	17,0	79,2	15,2
2	52,1	17,3	73,4	16,2	81,3	16,3
3	39,2	18,2	75,9	17,3	79,6	15,7
4	43,4	16,4	72,5	16,7	80,4	15,8
5	45,7	17,1	78,1	16,9	79,0	15,2
6	38,2	15,2	78,4	17,2	81,2	16,3
7	40,3	17,1	77,2	18,2	80,2	17,0
8	39,1	17,8	79,2	16,2	83,1	15,1

b. DEPRESORES

En la tabla 13 se presenta los resultados obtenidos para el porcentaje de cobre y hierro recuperados para cada depresor ensayado, con la muestra de la mina Las Bambas.

Tabla 13. Evaluación de depresores – Las Bambas

# Experimento	Quebracho		Ácidos húmicos		Peróxido de hidrógeno	
	% Cu	% Fe	% Cu	% Fe	% Cu	% Fe
1	89,1	14,2	89,2	35,5	58,7	10,2
2	89,7	15,3	89,9	35,7	58,2	12,3
3	88,4	14,3	88,7	35,1	59,6	12,1
4	87,9	15,5	86,9	35,0	60,8	10,4
5	90,1	13,1	85,2	34,7	52,5	11,7
6	86,4	12,7	88,6	35,0	53,1	10,5
7	87,8	16,2	87,5	34,8	59,2	11,2
8	88,2	12,5	90,1	34,9	53,5	10,9

MINA: CHINALCO**a. COLECTORES**

En la tabla 14 se presenta los resultados obtenidos para el porcentaje de cobre y hierro recuperados para cada colector ensayado, con la muestra de la mina Chinalco.

Tabla 14. Evaluación de colectores - Chinalco

# Experimento	Líquido iónico		Almidón		Ácidos húmicos	
	% Cu	% Fe	% Cu	% Fe	% Cu	% Fe
1	45,8	18,4	74,2	16,1	89,2	13,4
2	50,1	18,3	73,5	15,7	88,4	11,8
3	39,3	17,8	72,8	14,9	87,5	12,2
4	47,8	17,6	71,9	16,2	86,6	11,8
5	38,4	18,3	72,2	14,8	89,1	11,9

6	39,6	19,2	76,4	15,6	89,1	12,6
7	41,2	18,1	75,2	15,1	87,6	12,6
8	40,5	17,6	75,3	16,3	86,4	13,0

b. DEPRESORES

En la tabla 15 se presenta los resultados obtenidos para el porcentaje de cobre y hierro recuperados para cada depresor ensayado, con la muestra de la mina Chinalco.

Tabla 15. Evaluación de depresores - Chinalco

# Experimento	Quebracho		Ácidos húmicos		Peróxido de hidrógeno	
	% Cu	% Fe	% Cu	% Fe	% Cu	% Fe
1	89,4	13,7	89,4	31,9	57,6	11,6
2	88,5	14,1	88,7	30,2	55,9	11,3
3	89,1	13,8	89,5	32,7	56,4	11,2
4	89,6	13,2	86,1	32,6	56,3	10,7
5	90,3	13,6	86,3	31,4	57,7	12,1
6	89,7	12,6	87,8	30,1	58,1	10,1
7	88,1	13,2	89,0	30,5	56,4	11,8
8	89,4	12,9	90,2	31,1	57,3	11,2

MINA: CONDESTABLE

a. COLECTORES

En la tabla 16 se presenta los resultados obtenidos para el porcentaje de cobre y hierro recuperados para cada colector ensayado, con la muestra de la mina Condestable.

Tabla 16. Evaluación de colectores - Condestable

# Experimento	Líquido iónico		Almidón		Ácidos húmicos	
	% Cu	% Fe	% Cu	% Fe	% Cu	% Fe
1	50,2	17,5	75,2	16,1	89,2	12,2
2	53,2	18,1	74,6	16,3	87,4	12,5
3	54,1	16,8	73,8	15,8	87,4	11,8
4	57,3	17,1	74,2	16,0	88,4	11,7
5	56,8	16,5	77,2	15,3	88,8	11,0
6	55,9	18,2	77,1	15,2	89,1	11,4
7	56,1	17,8	76,1	16,8	89,3	12,5
8	57,3	16,4	75,2	16,1	89,2	12,2

b. DEPRESORES

En la tabla 17 se presenta los resultados obtenidos para el porcentaje de cobre y hierro recuperados para cada depresor ensayado, con la muestra de la mina Condestable.

Tabla 17. Evaluación de depresores – Condestable

# Experimento	Quebracho		Ácidos húmicos		Peróxido de hidrógeno	
	% Cu	% Fe	% Cu	% Fe	% Cu	% Fe
1	87,1	12,5	87,6	32,1	55,8	9,8
2	85,7	12,7	84,5	31,0	56,2	10,2
3	86,2	13,2	87,1	31,7	57,1	10,4
4	88,1	12,8	88,3	31,6	55,9	11,2
5	87,6	13,6	87,5	31,0	56,2	9,9
6	87,4	12,5	85,6	30,1	57,1	9,7
7	86,8	11,9	88,2	30,7	55,8	10,2
8	87,1	12,8	86,7	30,4	56,4	10,1

8.1.3. CARACTERIZACIÓN DE LA INTERACCIÓN COLECTOR, DEPRESOR CON LOS MINERALES

a. FT-IR

MINA: LAS BAMBAS

En las figuras 6 a 9 se muestra los espectros FT-IR obtenidos para caracterizar la interacción colector – depresor con el mineral procedente de Las Bambas.

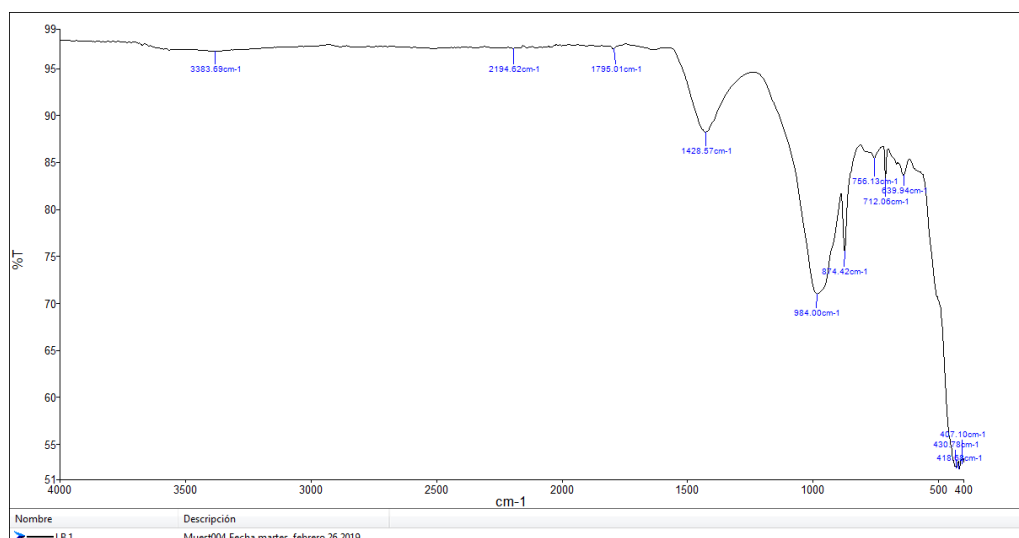


Figura 6. Espectro FT - IR de interacción almidón - H₂O₂ con el mineral Las Bambas

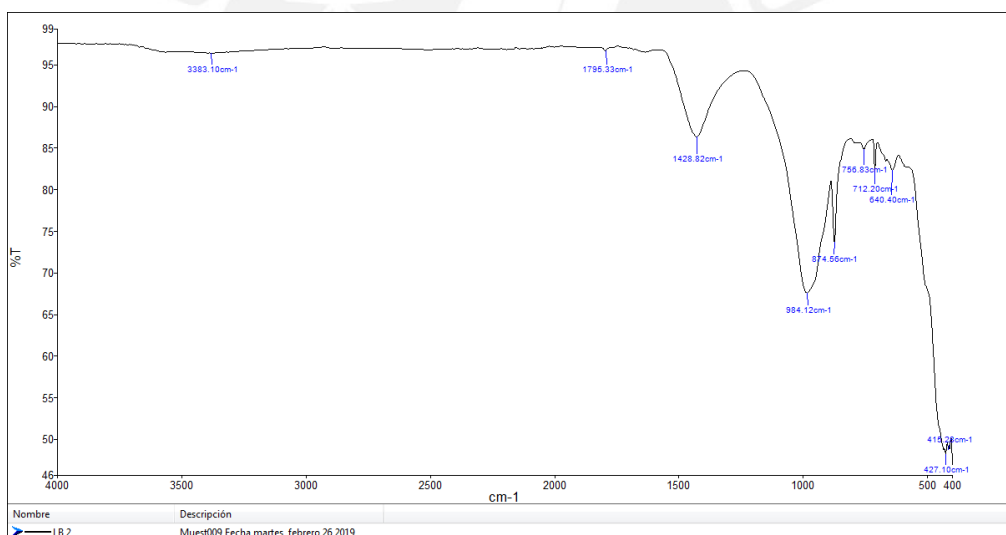


Figura 7. Espectro FT - IR de interacción almidón - quebracho con el mineral Las Bambas

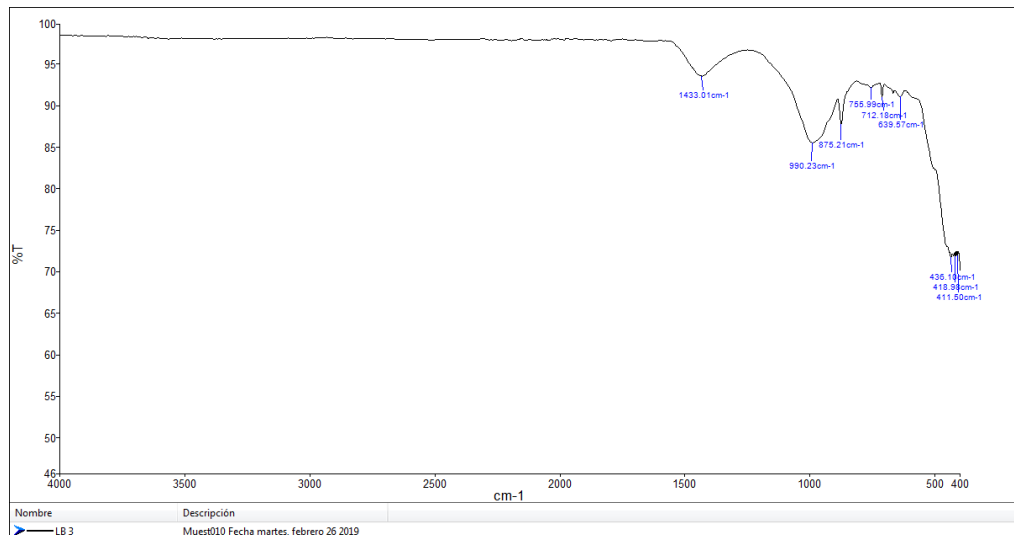


Figura 8. Espectro FT-IR de interacción ácidos húmicos y fúlvicos - H_2O_2 con el mineral Las Bambas

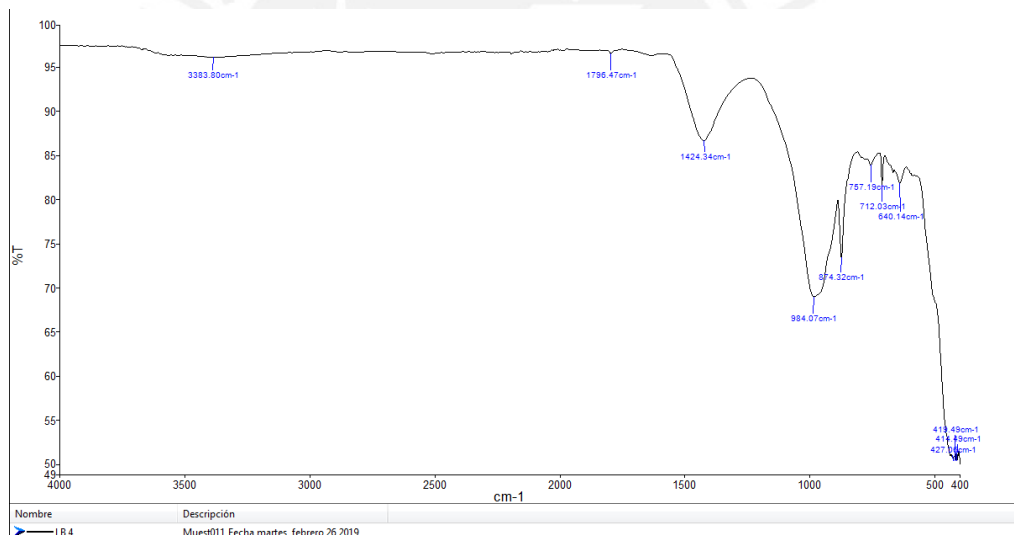


Figura 9. Espectro FT-IR de interacción ácidos húmicos y fúlvicos - quebracho con el mineral Las Bambas

MINA: CHINALCO

En las figuras 10 a 13 se muestra los espectros FT-IR obtenidos para caracterizar la interacción colector – depresor con el mineral procedente de Chinalco.

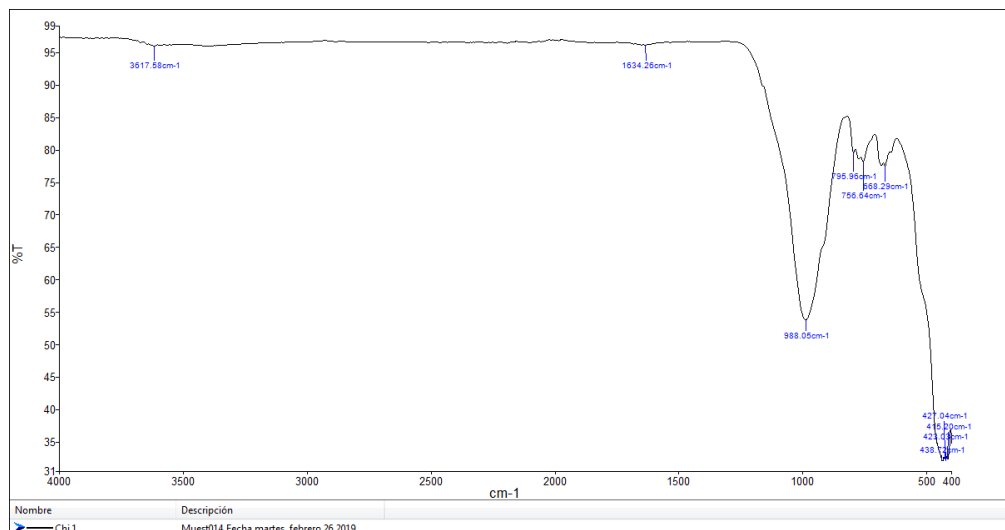


Figura 10. Espectro FT-IR de interacción almidón - H₂O₂ con el mineral Chinalco

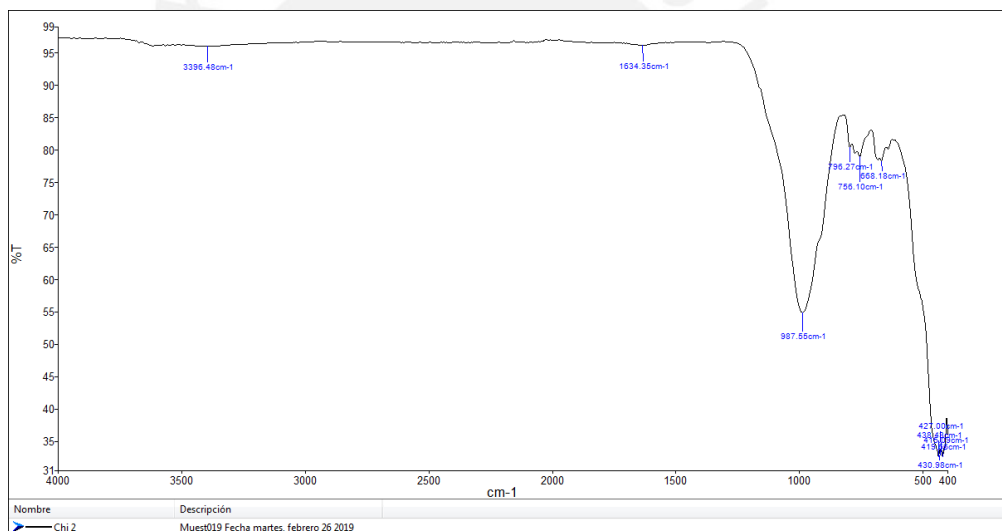


Figura 11. Espectro FT-IR de interacción almidón - quebracho con el mineral Chinalco

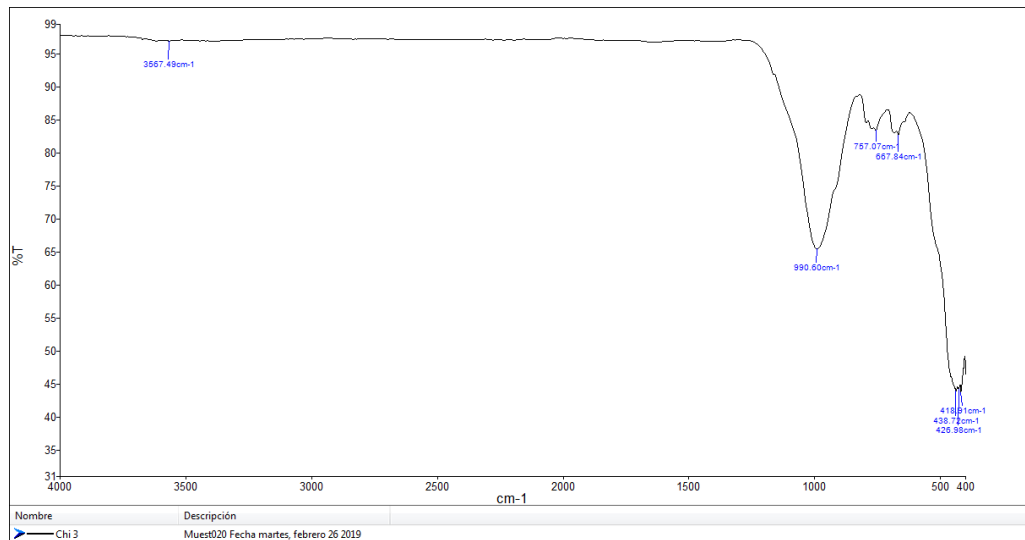


Figura 12. Espectro FT-IR de interacción ácidos húmicos y fúlvicos - H_2O_2 con el mineral Chinalco

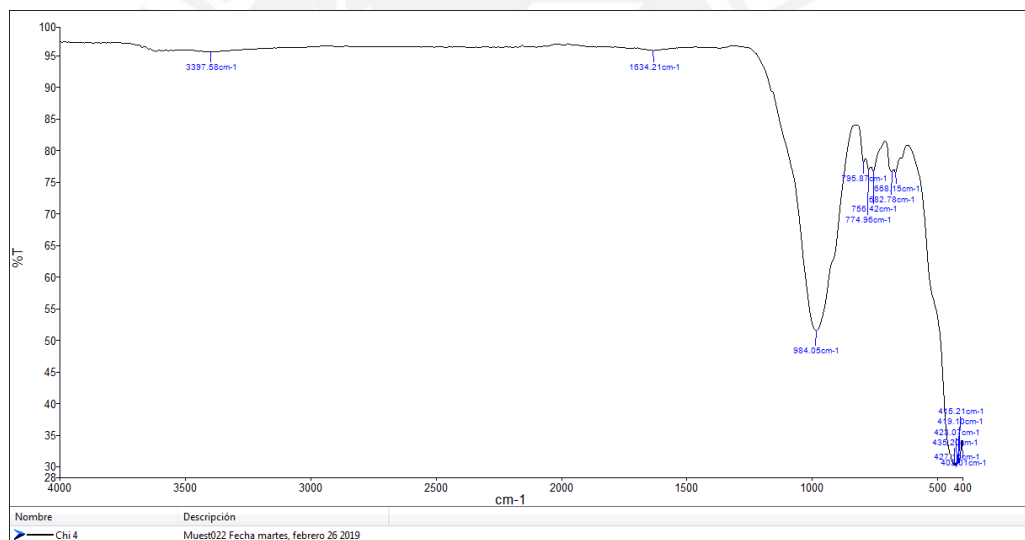


Figura 13. Espectro FT-IR de interacción ácidos húmicos y fúlvicos - quebracho con el mineral Chinalco

MINA: CONDESTABLE

En las figuras 14 a 17 se muestra los espectros FT-IR obtenidos para caracterizar la interacción colector – depresor con el mineral procedente de Condestable.

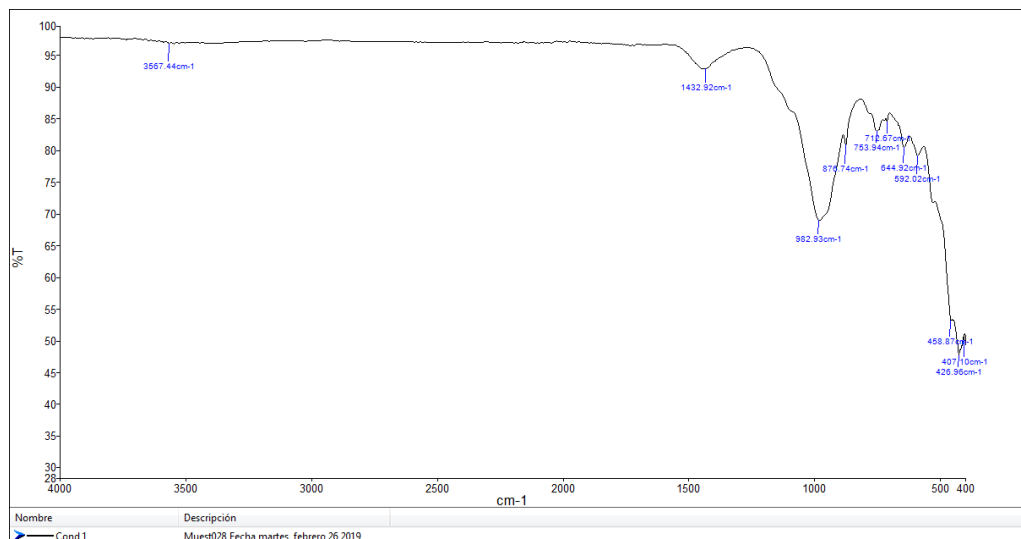


Figura 14. Espectro FT-IR de interacción almidón - H₂O₂ con el mineral Condestable

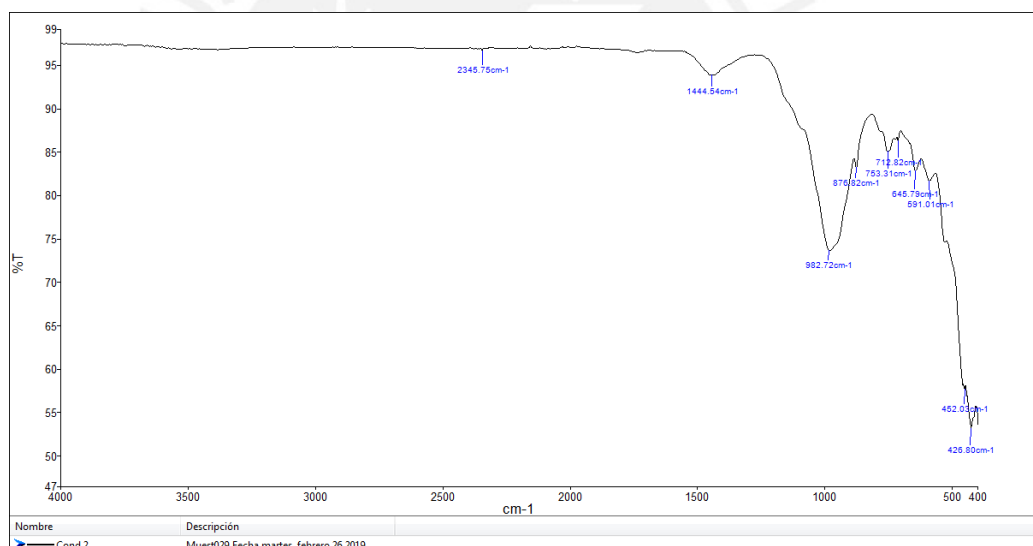


Figura 15. Espectro FT-IR de interacción almidón - quebracho con el mineral Condestable

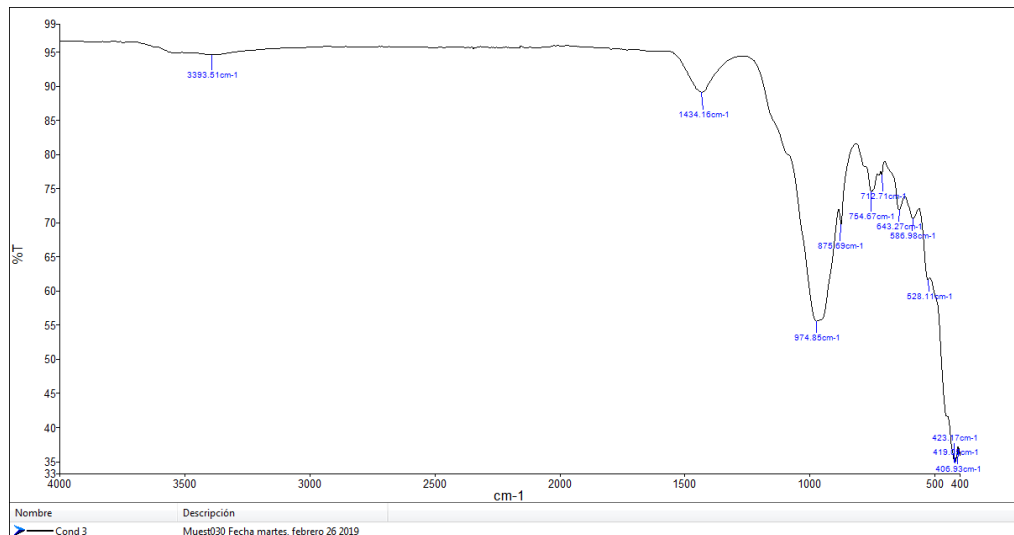


Figura 16. Espectro FT-IR de interacción ácidos húmicos y fúlvicos - H_2O_2 con el mineral Condestable

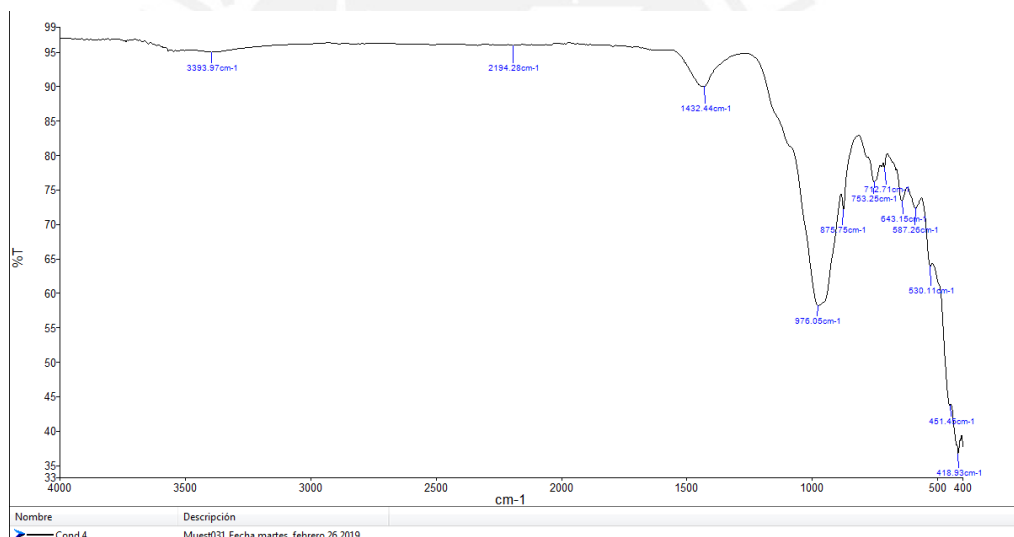


Figura 17. Espectro FT-IR de interacción ácidos húmicos y fúlvicos - quebracho con el mineral Condestable

b. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

MINA: LAS BAMBAS

Las figuras 18 a 21 muestran las micrografías obtenidas para cada una de las microflotaciones verdes ensayadas con el mineral procedente de Las Bambas.

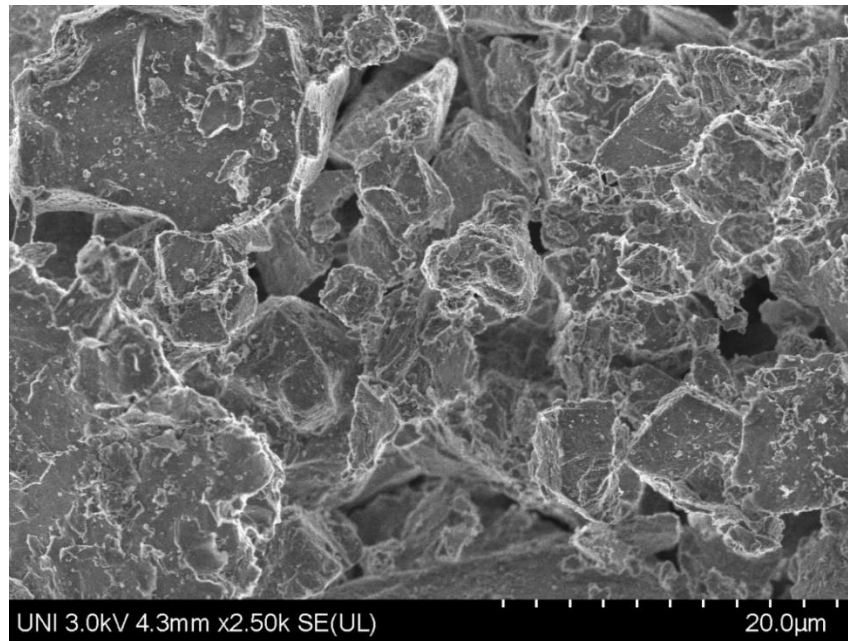


Figura 18. Micrografía de microflotación verde 1

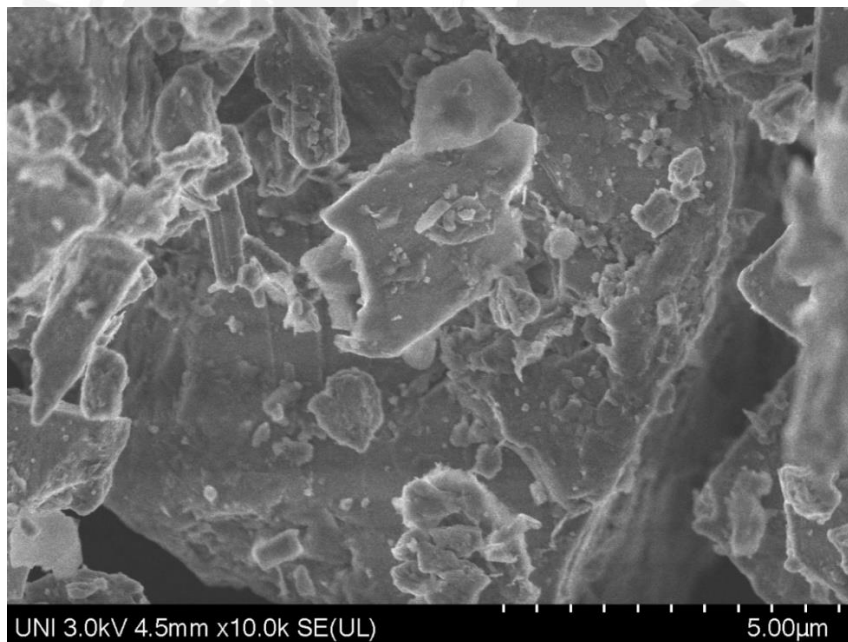


Figura 19. Micrografía de microflotación verde 2

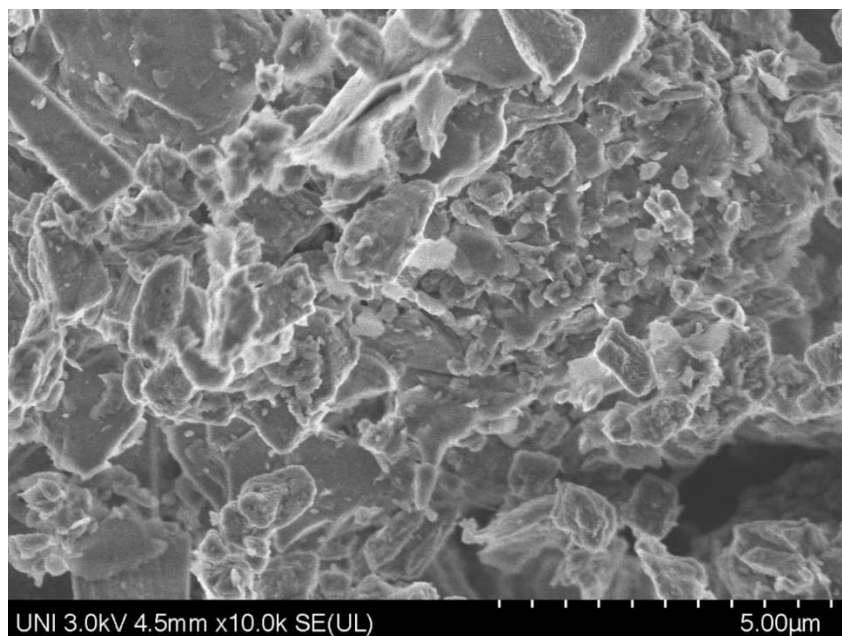


Figura 20. Micrografía de microflotación verde 3

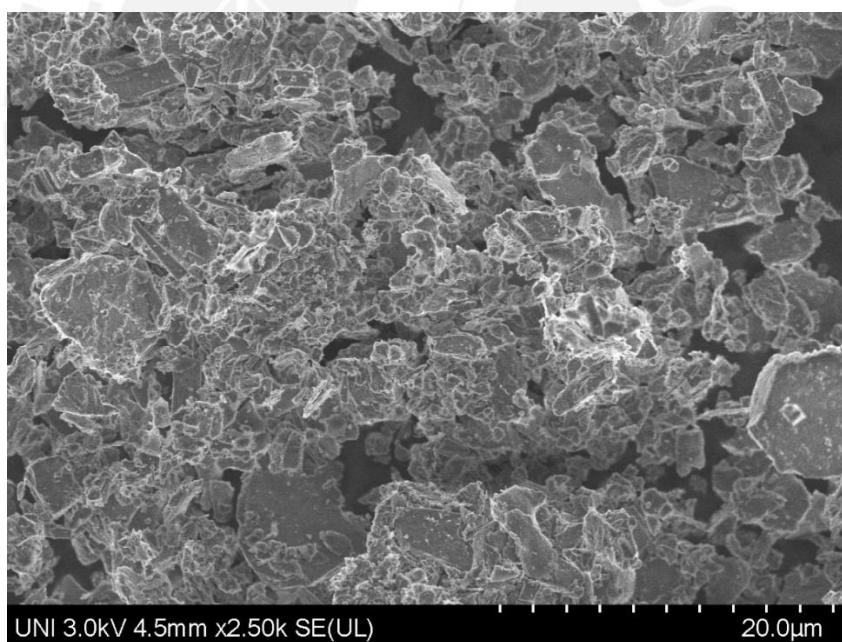


Figura 21. Micrografía de microflotación verde 4

MINA: CHINALCO

Las figuras 22 a 25 muestran las micrografías obtenidas para cada una de las microflotaciones verdes ensayadas con el mineral procedente de Chinalco.

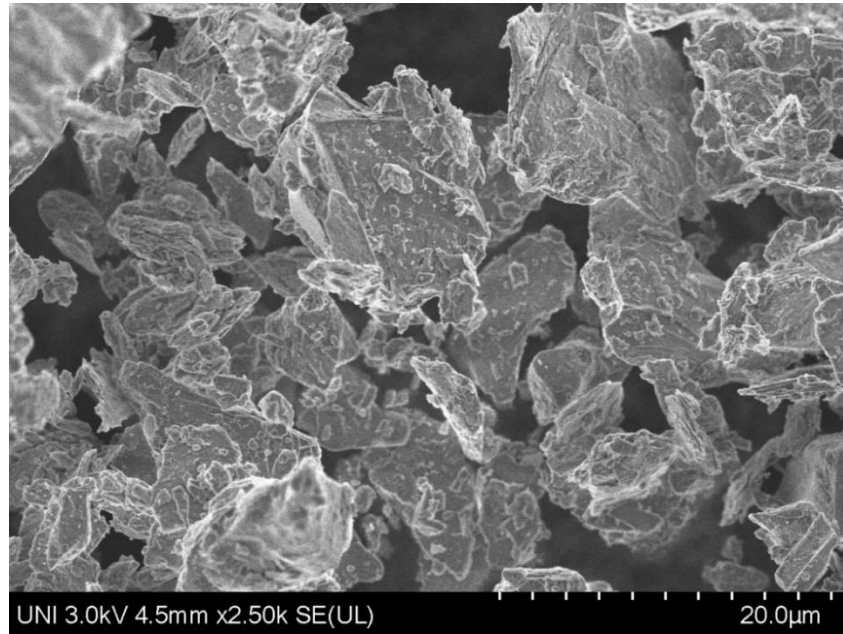


Figura 22. Micrografía de microflotación verde 1

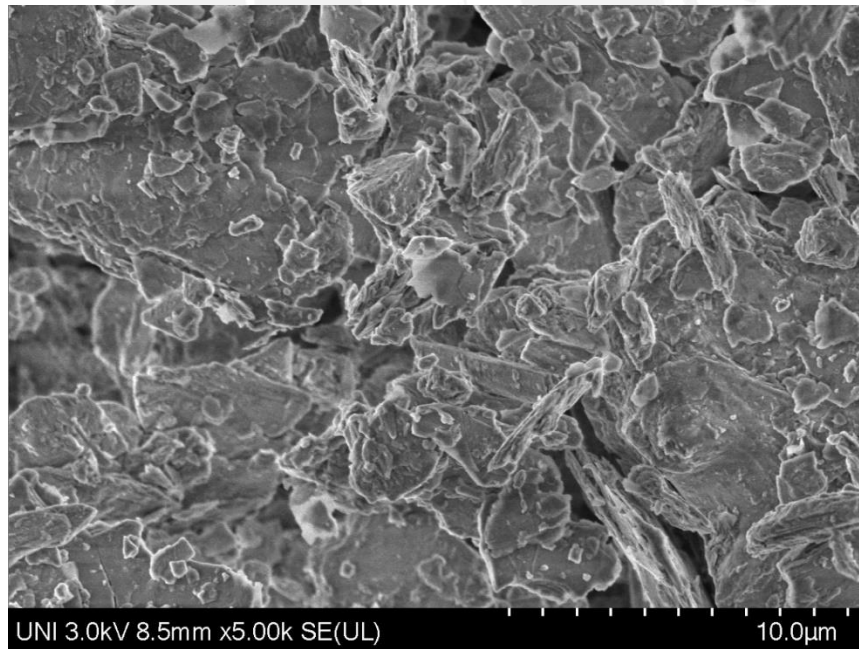


Figura 23. Micrografía de microflotación verde 2

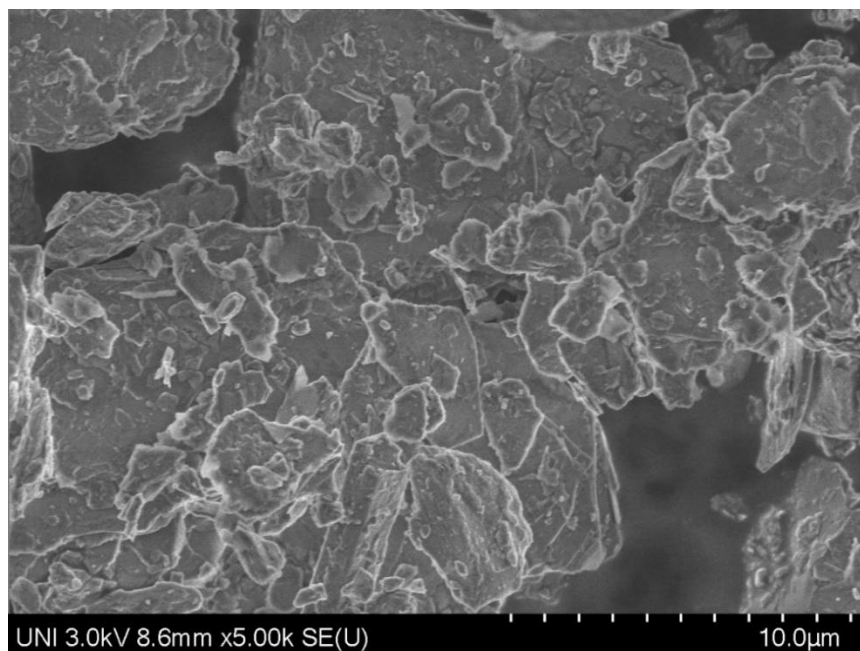


Figura 24. Micrografía de microflotación verde 3

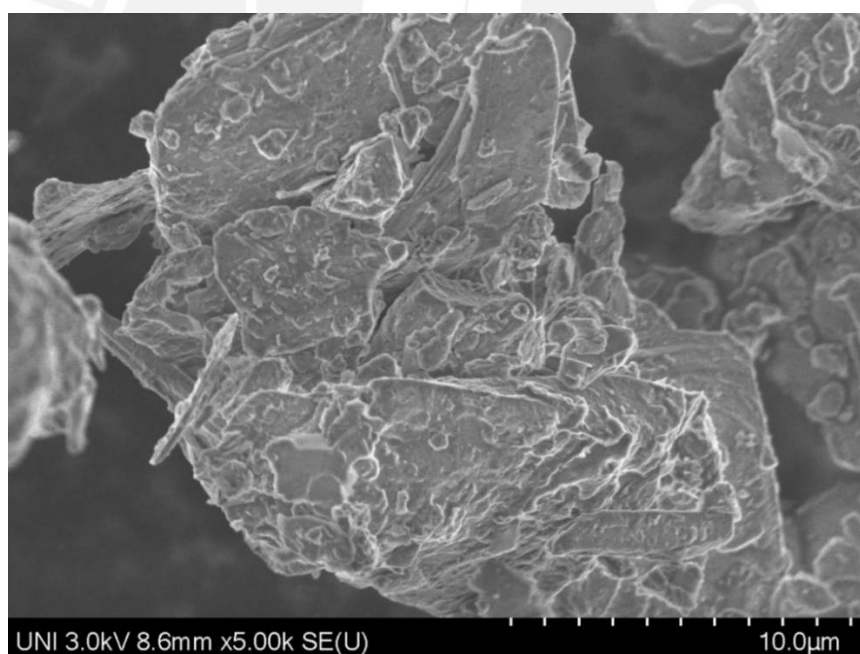


Figura 25. Micrografía de microflotación verde 4

MINA: CONDESTABLE

Las figuras 26 a 29 muestran las micrografías obtenidas para cada una de las microflotaciones verdes ensayadas con el mineral procedente de Condestable.

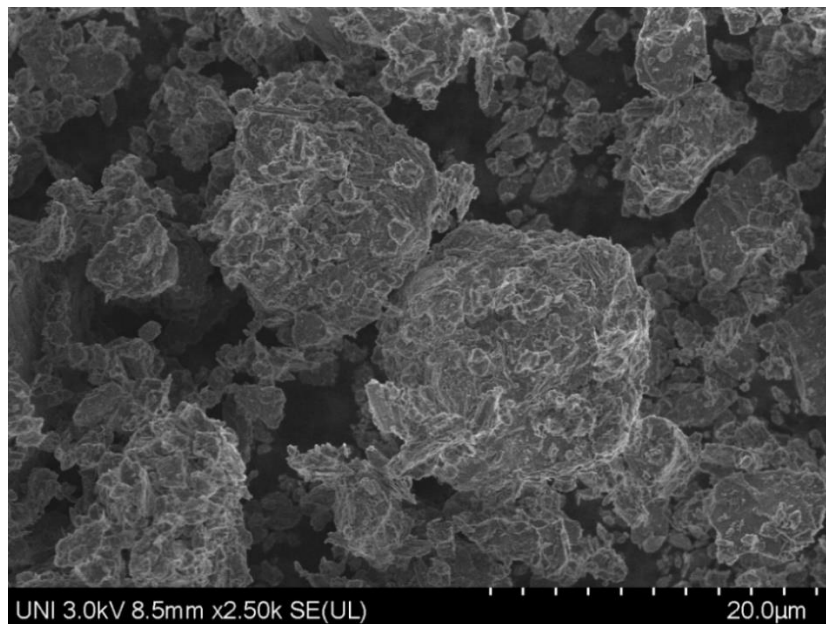


Figura 26. Micrografía de microflotación verde 1

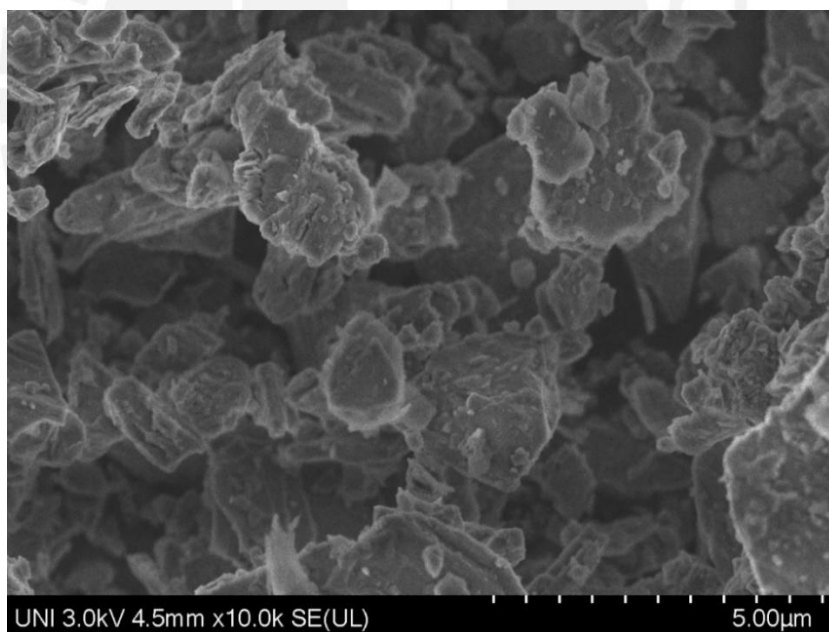


Figura 27. Micrografía de microflotación verde 2

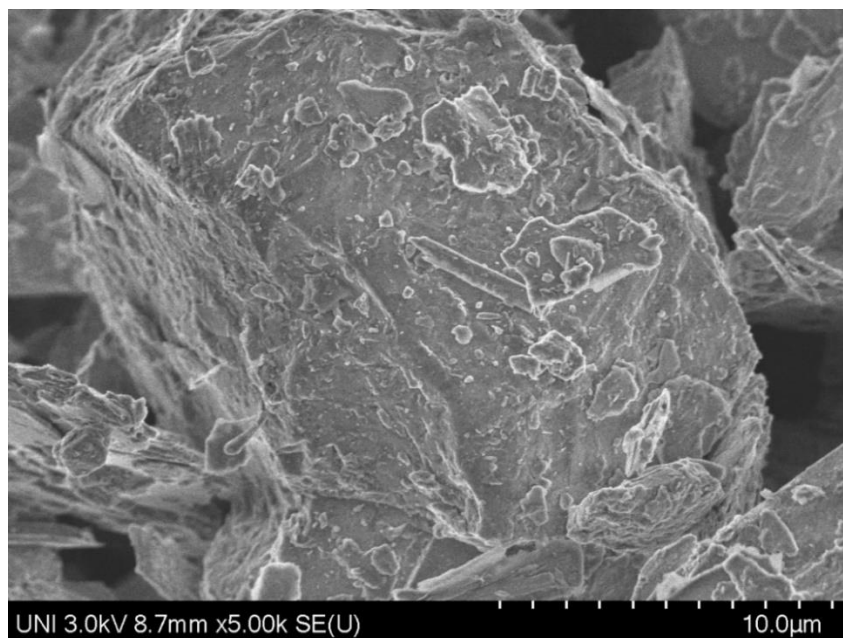


Figura 28. Micrografía de microflotación verde 3

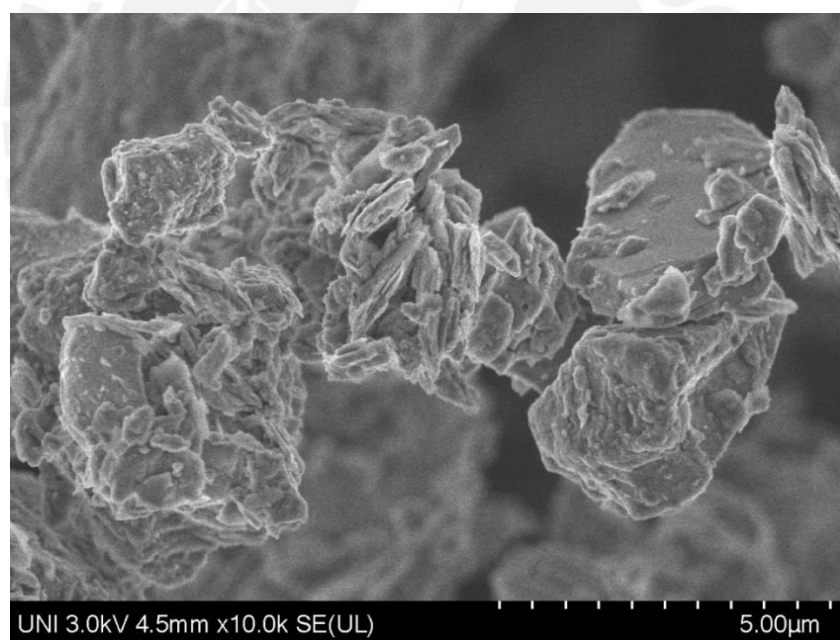


Figura 29. Micrografía de microflotación verde 4

9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

9.1. MICROFLOTACIÓN VERDE

A partir de los resultados obtenidos se descarta el líquido iónico 1-etil-3-metilimidazolio tiocianato, debido a la baja recuperación de cobre (50 % aproximadamente). Se realizaron 4 microflotaciones por mina con los reactivos y a las condiciones que dieron mejores resultados, a estas microflotaciones las denominamos *microflotación verde*, porque se reemplazó a los reactivos estándar por los reactivos verdes. A continuación, se detallan los reactivos y las condiciones que dieron mejores resultados (Tablas 18 a 20).

Tabla 18. Condiciones de los reactivos de flotación con mejores resultados

	COLECTORES		DEPRESORES	
	Almidón	Ácidos Húmicos	H ₂ O ₂	Quebracho
Dosificación de reactivo (gotas)	3	3	1	3
Tiempo de acondicionamiento (min)	8	12	8	8
Agitación (rpm)	600	600	600	600

Tabla 19. Condiciones de las microflotaciones verdes

CONDICIONES	M1	M2	M3	M4
COLECTOR	Almidón	Almidón	Ácidos Húmicos	Ácidos Húmicos
DEPRESOR	H ₂ O ₂	Quebracho	H ₂ O ₂	Quebracho
Tiempo de acondicionamiento (min)	8	8	8	8
Tiempo de flotación (min)	1	1	1	1
Tiempo de remoción (min)	1	1	1	1
Cantidad de mineral (g)	1	1	1	1
Agitación (rpm)	600	600	600	600

Tabla 20. Porcentaje de recuperación de cobre y hierro de las tres minas

N° MICROFLOTACIÓN VERDE	Las Bambas		Chinalco		Condestable	
	% Cu	% Fe	% Cu	% Fe	% Cu	% Fe
1	78,2	20,1	77,9	21,1	77,7	20,5
2	60,2	42,5	60,6	43,5	58,6	42,2
3	80,5	19,8	81,1	19,2	81,2	18,1
4	78,7	21,5	79,7	22,9	78,3	21,2

9.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS MICROFLOTACIONES VERDES

9.2.1. FT – IR

MINA: LAS BAMBAS

En el espectro FT-IR de la microflotación verde 1 (Figura 6), con almidón como reactivo colector y peróxido de hidrógeno como depresor, se observa un pico a 2194,62 cm⁻¹ del peróxido de hidrógeno, además picos a 1795,01 y 1428,57 cm⁻¹

del grupo carboxilo por la oxidación del almidón con el peróxido de hidrógeno. Para el espectro de la microflotación verde 2 (Figura 7), con almidón como colector y quebracho como depresor, se observan picos a 1795,33 y 1428,82 cm^{-1} características de almidón. Para el espectro de la microflotación verde 3 (Figura 8), con ácidos húmicos como colectores y peróxido de hidrógeno como depresor se observa un pico a 1433.01 cm^{-1} que se atribuye a los ácidos húmicos. La microflotación verde 4 (Figura 9) con ácidos húmicos como colectores y quebracho como depresor presenta picos a 3383,80; 1796,47 cm^{-1} correspondientes a los ácidos húmicos.

MINA: CHINALCO

En el espectro FT-IR de la microflotación verde 1 (Figura 10), con almidón y quebracho como colector y peróxido de hidrógeno como depresor, se observa un pico a 1634,35 cm^{-1} correspondiente al almidón oxidado. En el espectro de la microflotación verde 2 (Figura 11), se observan picos característicos a 1634,35 cm^{-1} del almidón. Para el espectro de la microflotación verde 3 (Figura 12), no se observan los picos a 1578,20; 1509.11 y 1379,29 cm^{-1} de ácidos húmicos, lo que puede indicar una absorción química entre ellos y el cobre del mineral. Para el espectro de la microflotación verde 4 (Figura 13) se observa un pico a 1634,21 cm^{-1} proveniente de los ácidos húmicos y no se observa el pico a 2917,94 cm^{-1} de ellos, lo que podría indicar una absorción química entre ellos y el cobre del mineral.

MINA: CONDESTABLE

En el espectro FT - IR de la microflotación verde 1 (Figura 14) no aparece el pico del almidón a $1627,44\text{ cm}^{-1}$ lo que podría indicar la absorción química del almidón en el cobre del mineral, además de no aparecer el pico $2925,70\text{ cm}^{-1}$. Para el espectro FT - IR de la microflotación verde 2 (Figura 15) no aparecen los picos a $3291,76$; $2926,70\text{ cm}^{-1}$ del almidón, pero sí un pico a $1444,54\text{ cm}^{-1}$ lo que podría indicar la absorción química del almidón con el cobre del mineral. Los espectros FT - IR de las microflotaciones verdes 3 y 4 no presentan los picos a $2917,94$; $1578,20$; $1509,11$ ni $1379,29\text{ cm}^{-1}$ correspondientes a los ácidos húmicos, aparece un pico a $974,85$ y $1434,16\text{ cm}^{-1}$ desplazado para la microflotación verde 3 (Figura 16); y un pico a $2194,28\text{ cm}^{-1}$ para la microflotación verde 4 (Figura 17). Estos desplazamientos y picos adicionales respecto a los espectros de los reactivos de flotación utilizados inicialmente pueden indicar la absorción química del ácido húmico en el cobre del mineral.

Tabla 21. Resumen del análisis por FT - IR del concentrado obtenido de las microflotaciones verde 1 de las tres minas

Longitud de onda (cm^{-1})	Microflotación verde 1		
	Las Bambas	Chinalco	Condestable
2194,62	Pico característico del peróxido de hidrógeno	No aparece	No aparece
1795,01 1634,35 1492,92	Grupo carboxilo del almidón oxidado. Absorción química entre el almidón y el cobre		

Tabla 22. Resumen del análisis por FT - IR del concentrado obtenido de las microflotaciones verde 2 de las tres minas

Longitud de onda (cm ⁻¹)	Microflotación verde 2		
	Las Bambas	Chinalco	Condestable
1795,33 1634,35	Pico del almidón, absorción química con el cobre	Pico del almidón, absorción química con el cobre	-
1444,54	-	-	Pico del almidón, absorción química con el cobre

Tabla 23. Resumen del análisis por FT - IR del concentrado obtenido de las microflotaciones verde 3 de las tres minas

Longitud de onda (cm ⁻¹)	Microflotación verde 3		
	Las Bambas	Chinalco	Condestable
2917,94	No aparece, absorción química entre los ácidos húmicos y el cobre		
1578,20 1433,01	Aparece un pico característico de los ácidos húmicos	No aparece, absorción química entre los ácidos húmicos y el cobre	Aparece un pico característico de los ácidos húmicos
974,85	No aparece	No aparece	Pico de los ácidos húmicos

Tabla 24. Resumen del análisis por FT - IR del concentrado obtenido de las microflotaciones verde 4 de las tres minas

Longitud de onda (cm ⁻¹)	Microflotación verde 4		
	Las Bambas	Chinalco	Condestable
3393,97 3383,80	Picos característicos de los ácidos húmicos		
2917,94	No aparece, absorción química entre los ácidos húmicos y el cobre		
1796,47 1634,21	Aparece un pico característico de los ácidos húmicos	Aparece un pico característico de los ácidos húmicos	Aparece un pico desplazado a 1432,44 cm ⁻¹ característico de los ácidos húmicos

9.2.2. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

MINA: LAS BAMBAS

En la micrografía de la microflotación verde 1 (Figura 18), se observa la absorción física del almidón en la superficie del mineral, del análisis por absorción atómica del mineral, 78,1 % de cobre y 20,01 % de hierro (pirita), se deduce que el almidón se absorbe selectivamente al cobre por el alto contenido detectado. Para la microflotación verde 2 (Figura 19), se observa la absorción del almidón en el cobre (60,5 %) y hierro. La interacción entre el almidón y el cobre se da mediante su grupo polar activo - OH, - CO con la superficie del mineral, la absorción es no selectiva y se comprueba con el EDS (Figura 30).

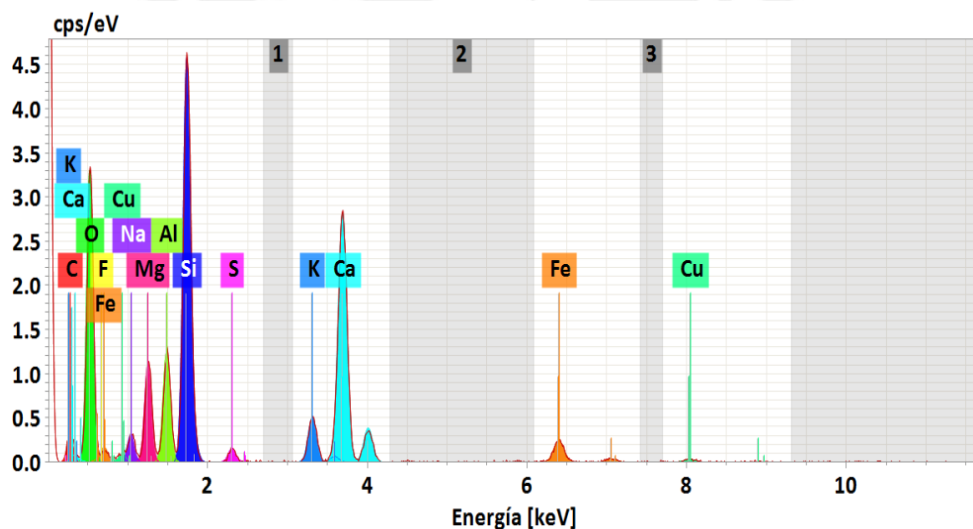


Figura 30. EDS de la microflotación verde 2 - Las Bambas

En la micrografía de la microflotación verde 3 (Figura 20), se observa la absorción de los ácidos húmicos mediante su grupo polar (- OH) en la superficie del mineral, de los datos obtenidos por absorción atómica (80,5 % de cobre, 19,8 % de hierro), la absorción se da selectivamente al cobre y no al hierro presente. En la micrografía de a microflotación verde 4 (Figura 21), se observa también la

absorción de los ácidos húmicos en la superficie del mineral, de los datos obtenidos del análisis por absorción atómica (78,7 % de cobre, 21,5 % de hierro), se deduce que estos ácidos se absorben al cobre selectivamente.

MINA: CHINALCO

En la micrografía de la microflotación verde 1 (Figura 22), se observa la absorción física del almidón en la superficie del mineral, del análisis por absorción atómica al concentrado de mineral (77,9 % de cobre y 21,1 % de hierro), se deduce que el almidón se absorbe selectivamente al cobre y no al hierro, mediante su grupo polar activo (- OH, - CO). En la micrografía de la microflotación verde 2 (Figura 23), se observa la absorción del almidón en la superficie del mineral, de los datos por absorción atómica se deduce que la absorción se da en el cobre, y también en el hierro, como se confirma con el EDS obtenido (Figura 31).

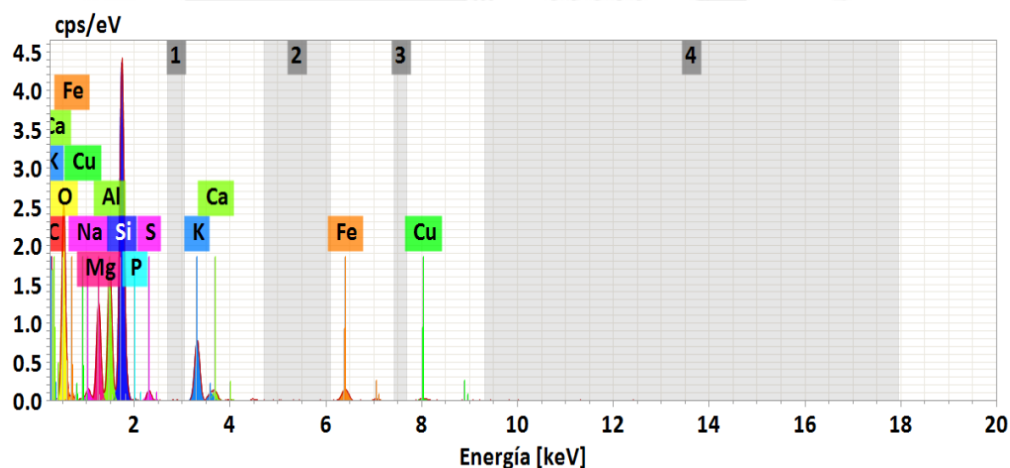


Figura 31. EDS de la microflotación verde 2 - Chinalco

En la micrografía de la microflotación verde 3 (Figura 24), se observa la absorción de los ácidos húmicos y fúlvicos mediante sus grupos polares activos (- OH) en la superficie del mineral, de los datos obtenidos del análisis por absorción atómica al concentrado de mineral (81,1 % de cobre, 19,2 % de hierro), se deduce que la

absorción es de manera selectiva al cobre y no al hierro. En la micrografía de la microflotación verde 4 (Figura 25), se observa la absorción de los ácidos húmicos y fúlvicos mediante sus grupos polares en la superficie del mineral, de los datos obtenidos por absorción atómica (79,7 % de cobre, 22,9 % de hierro), que la absorción es de manera selectiva al cobre.

MINA: CONDESTABLE

En la micrografía de la microflotación verde 1 (Figura 26), se observa la absorción del almidón en la superficie mineral, del análisis por absorción atómica (77,7 % de cobre, 20,5 % de hierro), se deduce que la absorción es de manera selectiva y se da mediante la interacción de los grupos polares del almidón (- OH, - CO) con el cobre. En la micrografía de la microflotación verde 2 (Figura 27), se observa la absorción no selectiva del almidón en la superficie mineral, de los datos obtenidos mediante absorción atómica (48,6 % de cobre, 42,2 % de hierro), esto se comprueba con el EDS (Figura 32).

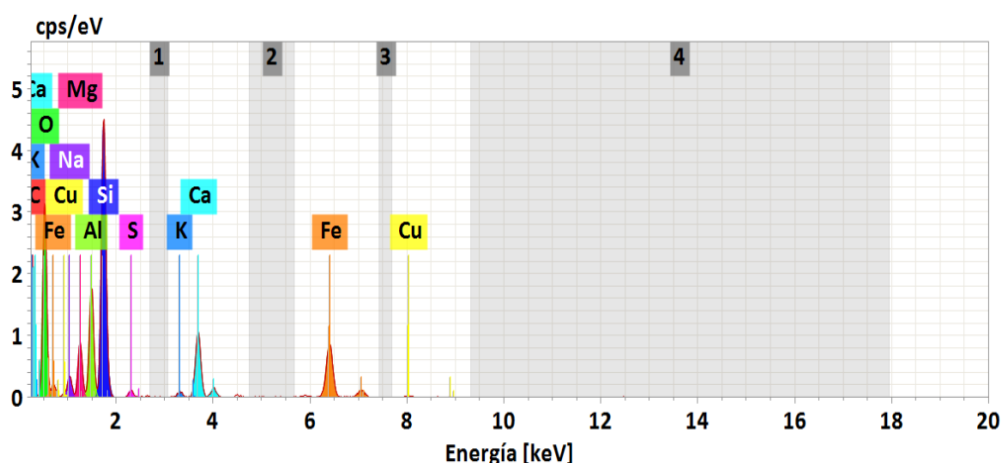


Figura 32. EDS de la microflotación verde 2 - Condestable

En la micrografía de la microflotación verde 3 (Figura 28), se observa la absorción de los ácidos húmicos mediante su grupo polar (- OH) en la superficie del mineral,

de los datos obtenidos por absorción atómica (81,3 % de cobre, 20,1 % de hierro), la absorción se da selectivamente al cobre y no al hierro presente. En la micrografía de a microflotación verde 4 (Figura 29), se observa también la absorción de los ácidos húmicos en la superficie del mineral, de los datos obtenidos del análisis por absorción atómica (79,5 % de cobre, 21,8 % de hierro), se deduce que estos ácidos se absorben al cobre selectivamente.

Tabla 25. Resumen del análisis EDS del concentrado obtenido de las microflotación verde 2 para las tres minas

Elemento	Las Bambas	Chinalco	Condestable
% Cu	0.56	0.74	0.50
% Fe	2.50	2.14	10.70
% Ca	12.33	0.83	5.70
% Si	11.85	18.51	15.67
% Na	1.87	1.34	2.69
% S	0.49	0.72	0.50

9.2.3. POSIBLES INTERACCIONES ENTRE LOS COLECTORES Y DEPRESORES CON EL COBRE Y HIERRO DEL MINERAL SULFURADO

MICROFLOTACIÓN VERDE 1

Colector: Almidón

Depresor: Peróxido de hidrógeno

El almidón cumplió su papel de colector para los minerales de las minas Las Bambas, Chinalco y Condestable, este actuó mediante la unión de sus grupos polares activos, hidroxilo y carboxilo (-OH, - CO respectivamente), en la superficie del cobre, la absorción de oxígeno promueve la deshidratación de la

superficie del mineral y facilita la absorción del almidón como colector, convirtiendo la superficie del mineral hidrofóbica, por tanto el sistema colector – cobre asciende en el tubo de Hallimond. El peróxido de hidrógeno oxida toda la superficie del mineral permitiendo así la absorción también del almidón, la pirita oxidada es deprimida con mayor facilidad a pH menor a 10.

MICROFLOTACIÓN VERDE 2

Colector: Almidón

Depresor: Quebracho

Para esta microflotación el almidón no cumple un papel principal en la colección del cobre para los minerales de las tres minas estudiadas Las Bambas, Chinalco y Condestable; esto es debido al depresor quebracho, de los análisis FT – IR y SEM – EDS, no muestran que el quebracho se absorbe en el cobre y en la pirita. Los grupos taninos presentes en el quebracho tienen una acción depresora en un rango amplio de pH (5 – 14), por lo que indistintamente al pH de la flotación 10 – 11, estos grupos taninos deprimen tanto al cobre como a la pirita presente en el mineral.

MICROFLOTACIÓN VERDE 3

Colector: Ácidos húmicos

Depresor: Peróxido de hidrógeno

El grado de recuperación de cobre es el más alto de las 4 microflotaciones para los minerales sulfurados de las minas estudiadas Las Bambas, Chinalco y Condestable. Los ácidos húmicos cumplen su papel como colectores de cobre, los análisis FT – IR y SEM muestran la acción colectora de los ácidos húmicos y

fúlvicos. El peróxido de hidrógeno oxida la superficie del mineral, la pirita oxidada se deprimió a pH menor a 10, con lo que los ácidos húmicos oxidados actúan como depresores de pirita a ese pH; se comprueba con el porcentaje de hierro obtenido siendo el menor para todas las minas y también actúan como colectores de cobre a un pH mayor a 10.

MICROFLOTACIÓN VERDE 4

Colector: Ácidos húmicos

Depresor: Quebracho

El grado de recuperación de cobre es alto para todos los minerales estudiados Las Bambas, Chinalco y Condestable. Los ácidos húmicos actúan como colectores de cobre, obteniendo un alto grado de recuperación comparado con la microflotación verde 3, estos datos se obtienen de los análisis FT –IR y SEM. El quebracho no interfiere en el papel de colector de los ácidos húmicos ya que estos presentan grupos funcionales activos diferentes al almidón (microflotación verde 2).

9.2.4. ESTRELLA VERDE

De los resultados obtenidos de la alternativa de flotación verde se comparan los reactivos de flotación y los resultados con la flotación convencional – tradicional.

Tabla 26. Comparación entre la flotación convencional y la flotación alternativa verde

	Flotación tradicional	Flotación Alternativa verde
Tiempo total de acondicionamiento (min)	10-15	10
Reactivo de flotación: Colector	Xantato MIBC, 2-etil hexanol	Almidón, Ácidos húmicos y fúlvicos
Reactivo de flotación: Depresor	NaCN	Quebracho, Peróxido de hidrógeno
Reactivo de flotación: Reguladores	Mezclas de alcoholes: MIBC, 2-etilhexanol, PPG	IL, MIBC, 2-etilhexanol
% Recuperación de Cobre	72 - 80	77 - 82
% Recuperación de Hierro	10 - 15	18 - 20

Tabla 27. Peligros y puntuación correspondientes de los reactivos de flotación convencional

Sustancia involucrada	Código de peligro	Puntaje		
		S	MA	AQ
Xantato	H252, H302+H312, H315, H319, H335	2	2	2
NaCN	H300, H310, H315, H318, H330, H372, H400, H410	3	3	3
MIBC	H226, H319, H335	2	2	1
2-etilhexanol	H227, H303, H331, H315, H319, H335, H402	2	2	1
Carbonato de sodio	H316, H319, H332	2	2	2

Tabla 28. Peligros y puntuación correspondientes de los reactivos de flotación – Alternativa verde

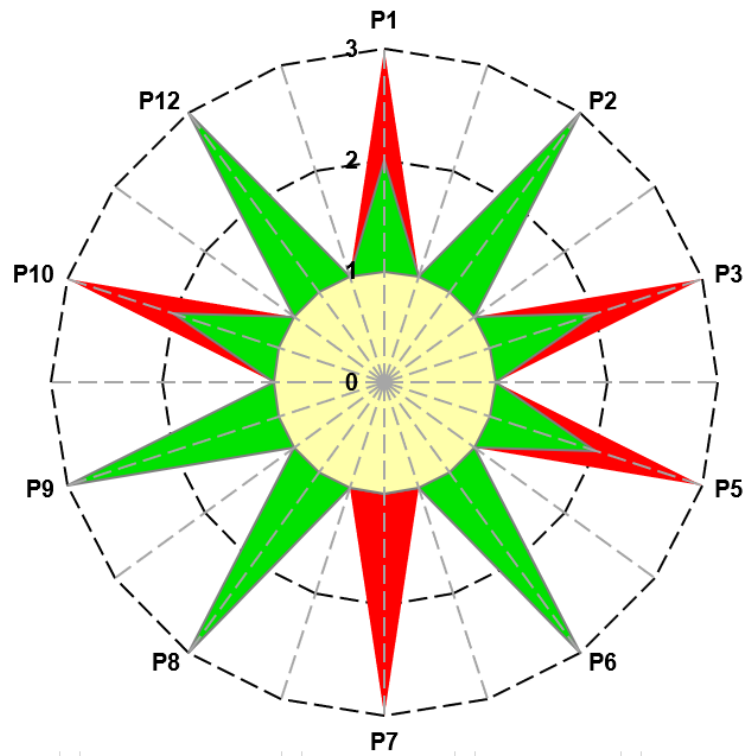
Sustancia involucrada	Código de peligro	Puntaje		
		S	MA	AQ
Almidón	No se clasifica como peligroso	0	0	0
Ácidos húmicos y fúlvicos	No se clasifica como peligroso	0	0	0
MIBC	H226, H319, H335	2	2	1
2-etilhexanol	H227, H303, H331, H315, H319, H335, H402	2	2	1
Quebracho	No se clasifica como peligroso	0	0	0
Peróxido de hidrógeno	H272, H302, H314, H332, H335, H401	3	3	1

Tabla 29. Criterios y puntajes utilizados para construir la estrella verde para la microflotación – Alternativa verde

Criterio	Puntaje	Explicación
P1- Prevención	2	Los desechos son ganga mineral
P2- Economía atómica	3	No se usan >10 % de reactivos
P3-Síntesis químicas menos peligrosa	2	Peróxido de hidrógeno
P5- Solventes y sustancias auxiliares más seguras	2	Se usa MIBC, 2-etilhexanol
P6- Incremento de la eficiencia energética	3	Temperatura y presión ambiental
P7- Uso de materia prima renovable	1	Ninguna sustancia es renovable
P8- Reducir las derivatizaciones	3	Todo es una etapa
P- 9 Catálisis	3	No se usan catalizadores
P10- Diseño degradable	2	Las sustancias pueden ser tratadas para ser renovables
P12- Prevención de accidentes químicos	3	Los reactivos de flotación tienen un bajo riesgo para provocar accidentes químicos

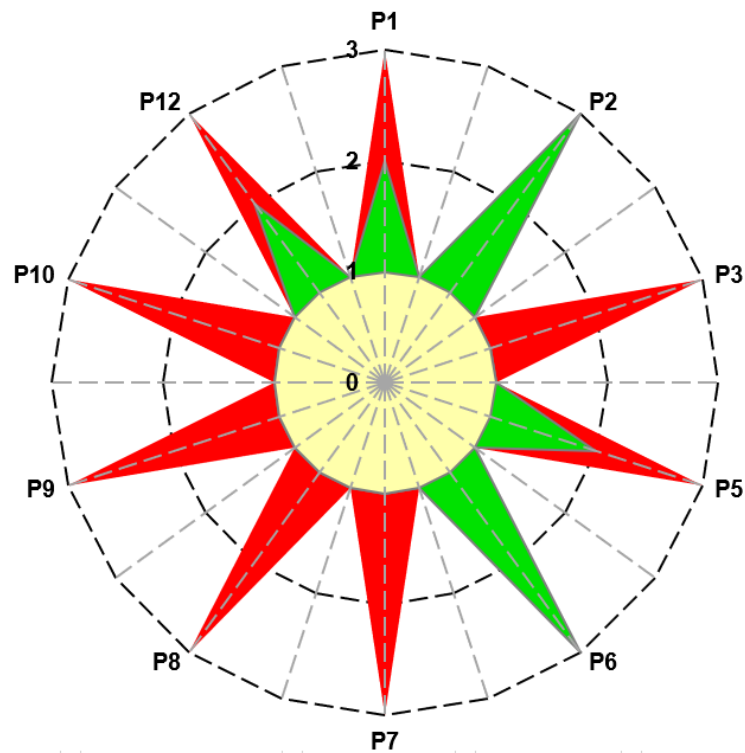
Tabla 30. Criterios y puntajes utilizados para construir la estrella verde para la flotación convencional

Criterio	Puntaje	Explicación
P1- Prevención	2	Los desechos son ganga mineral
P2 - Economía atómica	3	No se usan >10 % de reactivos
P3 -Síntesis químicas menos peligrosa	1	Xantato y NaCN no son compuestos seguros
P5 - Solventes y sustancias auxiliares más seguras	2	Se usa MIBC, 2-etilhexanol
P6 - Incremento de la eficiencia energética	3	Temperatura y presión ambiental
P7 - Uso de materia prima renovable	1	Ninguna sustancia es renovable
P8- Reducir las derivatizaciones	1	Pueden darse más etapas dependiendo de la selectiva del reactivo de flotación
P9 - Catálisis	1	Las sustancias no pueden ser tratadas para ser renovables
P10 - Diseño degradable	1	No son degradables
P12 - Prevención de accidentes químicos	2	Los reactivos de flotación tienen un alto riesgo para causar accidentes químicos



GSAI: 70.0

Figura 33. Estrella verde - Microflotación verde



GSAI: 35.0

Figura 34. Estrella verde - Flotación convencional

Se aplicó 10 principios de la Química verde para el estudio de las flotaciones. Como se detalla en las Tablas 26 y 30, la microflotación Verde – Alternativa tiene altos puntajes respecto a la flotación convencional, el GSAI de la microflotación verde es de 70.0; mientras que el GSAI de la flotación convencional es 35.0, la mitad que la anterior.



10. CONCLUSIONES

- Los reactivos orgánicos naturales evaluados almidón, quebracho, ácidos húmicos y el reactivo verde peróxido de hidrógeno cumplen como reactivos de flotación de minerales.
- El almidón y los ácidos húmicos cumplen el papel de colectores a pH mayor a 10. El quebracho y el peróxido de hidrógeno actúan como depresores a pH inferior a 10.
- El sistema almidón – quebracho presenta baja recuperación de cobre de los minerales estudiados procedentes de Las Bambas, Chinalco y Condestable, se debe a los grupos taninos presentes en el quebracho.
- Las recuperaciones de cobre más altas se dieron para el sistema ácidos húmicos y fúlvicos – peróxido de hidrógeno (microflotación verde 3), el peróxido de hidrógeno potencia la acción colectora de los ácidos húmicos y fúlvicos.
- El control de pH es importante para realizar las microflotaciones debido a que la pirita flota a un pH inferior a 10 y los minerales sulfurados de cobre flotan a pH mayores a 10.
- De acuerdo con la Estrella Verde, la flotación alternativa verde de minerales presenta un GSAI de 70 %, duplicando el valor obtenido para la flotación convencional con GSAI de 35 %. Por tanto, se puede afirmar que los reactivos orgánicos naturales y el reactivo verde peróxido de hidrógeno son una alternativa verde para la flotación de minerales con altos grados de recuperación de cobre y baja recuperación de hierro.

11. BIBLIOGRAFÍA

- (1) Reporte de análisis económico sectorial sector minería, El sector minero no metálico en el Perú Año 5 – N° 7, Diciembre 2016
- (2) J., Stanley, F. L., and Lutrell, G. H., Froth Flotation – Fundamental Principles. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Littleton, CO, 237-246
- (3) César Elias Arnao, Selección de equipos en sistemas de dosificación de reactivos a celdas de flotación. Cybertesis UNI, Lima-Perú 2004
- (4) Maria Sinche-Gonzalez, Daniel Fornasiero and Massimiliano Zanin, Flotation of Chalcopyrite and Molybdenite in the Presence of Organics in Water, Minerals MDPI (2016), 3-4
- (5) Hrushikesh Sahoo, Swagat S. Rath Bisweswar, Das, Barada Mishra, Flotation of quartz using ionic liquid collectors with different functional groups and varying chain lengths. Mineral Engineering, (2016), 2-3.
- (6) Davis, J.A., Adsorption of natural dissolved organic matter at the oxide/water interface. Geochim. Geochimica et Cosmochimica Acta, (2000), 320-332.
- (7) Bulatovic, S.M., Use of organic polymers in the flotation of polymetallic ores: A review. Mineral Engineering, (1999), 341–354.
- (8) Rao, S.; Finch, J. A review of water re-use in flotation. Mineral Engineering, (1989) 2, 65–85.
- (9) Hoover, M. Water chemistry effects in the flotation of sulphide ore: a review and discussion for molybdenite. Mineral MDPI, (2002), 100-112
- (10) Lai, R.W.M.; Stone, L.C.; Rimmasch, B.E. Effect of humus organics on the flotation recovery of molybdenite. Mineral Engineering (1984), 12, 163–172.
- (11) Ansari, A.; Pawlik, M., Floatability of chalcopyrite and molybdenite in the presence of lignosulfonates. Part I. Adsorption studies, (2007), 600–608.

- (12) Kelebek, S.; Yoruk, S.; Smith, G.W. Wetting behavior of molybdenite and talc in lignosulphonate/MIBC solutions and their separation by flotation. *Journal Separation Science and Technology*, (2001), 145–157.
- (13) Liu, W.; Moran, C.; Vink, S. Flotation of Chalcopyrite in Water Containing Bacteria. In *Water in Mineral Processing*; Society for Mining. Metallurgy and Exploration, (2012), 165–173.
- (14) Somasundaran, P. *Encyclopedia of Surface and Colloid Science*, 5th (2006), 30-36.
- (15) Schumann, R.; Levay, G.; Dunne, R.; Hart, S., Managing process water quality in base metal sulfide flotation. In *Proceeding of Water in Mining. Mine Water Conference*, (2003).
- (16) Santhiya, D.; Subramanian, S.; Natarajan, K.A. Surface chemical studies on sphalerite and salena using bacillus polymyxa II. Mechanisms of microbe-mineral interactions. *Journal of Colloid and Interface Science*, (2001), 298–309.
- (17) Huerta-Cerdán, A. d. I. R. J., González, C. & Genesca, J., Cyclic voltammetry and dielectric studies on PbS–potassium ethyl xanthate–dextrine system under flotation and depression conditions. *Journal of Materials Technology*, (2003), 23-27
- (18) B.J. Shean, J.J. Cilliers, A review of froth flotation control. *International Journal of Mineral Processing*, (2011), 2-13.
- (19) Laurila, H., Karesvuori, J., Tiili, O., Strategies for instrumentation and control of flotation circuits. *Mineral Processing Plant Design, Practise and Control*, (2002), 2174–2195.
- (20) Dianzuo Wang, *Flotation Reagents: Applied surface chemistry on minerals flotation and energy resources beneficiation*. Springer, (2015), 50-180, 279- 349.

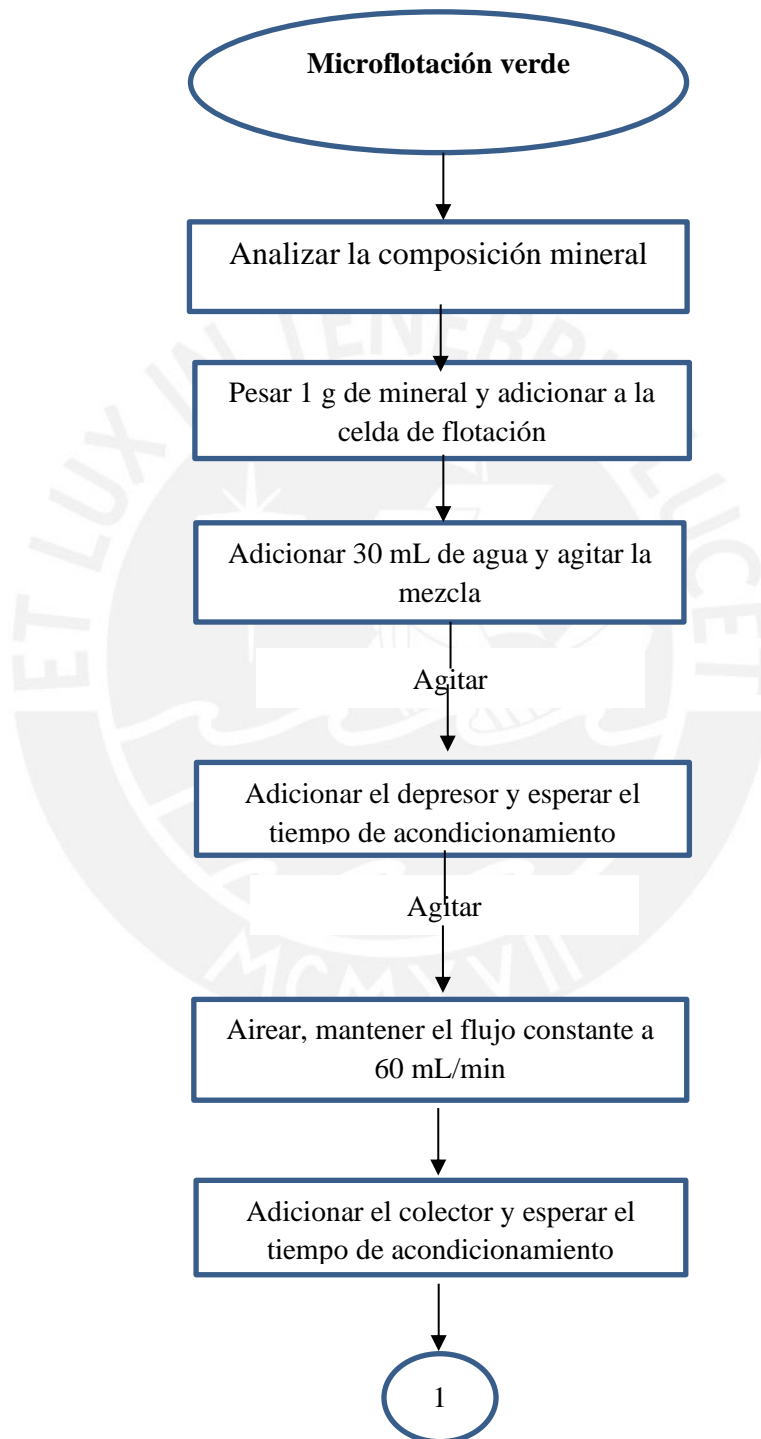
- (21) SM Bulatovic, Handbook of flotation reagents: chemistry, theory and practice: Volume 1: flotation of sulfide ores, (2007), 128-162.
- (22) W Wei, A Kumar, ME Holuszko, MD Mastalerz, Selection of reagents based on surface chemistry as derived from micro-FTIR mapping of coal surface to facilitate selectivity in coal flotation. The university of British Columbia, (2017), 2-5.
- (23) Hughes, C. Enhanced, Flotation Reagents for Beneficiation of Phosphate Ores. Mineral Engineering, (2000), 6-8.
- (24) Ansari, A.; Pawlik, M., Floatability of chalcopyrite and molybdenite in the presence of lignosulfonates. Mineral Engineering, 2007, 600–608.
- (25) Herrera-Urbina, Recent developments and advances in formulations and applications of chemical reagents used in froth flotation. Journal Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2003, 139–182.
- (26) W. Tolley, D. Kotlyar and R. Van Wagoner, Fundamental Electrochemical Studies of sulfide mineral flotation. Mineral Engineering, (1998), 3-16.
- (27) Y. Liao; Y. Cao; C. Liu; Y. Zhao; G. Zhu, Comparison of the effect of particle size on the flotation kinetics of a low-rank coal using air bubbles and oily bubbles. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, (2017), 4-6.
- (28) Asghar Azizi, Ahmad Hassanzadeh, Behnam Fadaei, Investigating the first-order flotation kinetics models for Sarcheshmeh copper sulfide ore. International Journal Mining Science and technology, (2015), 3-5.
- (29) Reza M. Rahman, Seher Ata *, Graeme J. Jameson, The effect of flotation variables on the recovery of different particle size fractions in the froth and the pulp. International Journal Mineral Processing, (2012), 2-5.

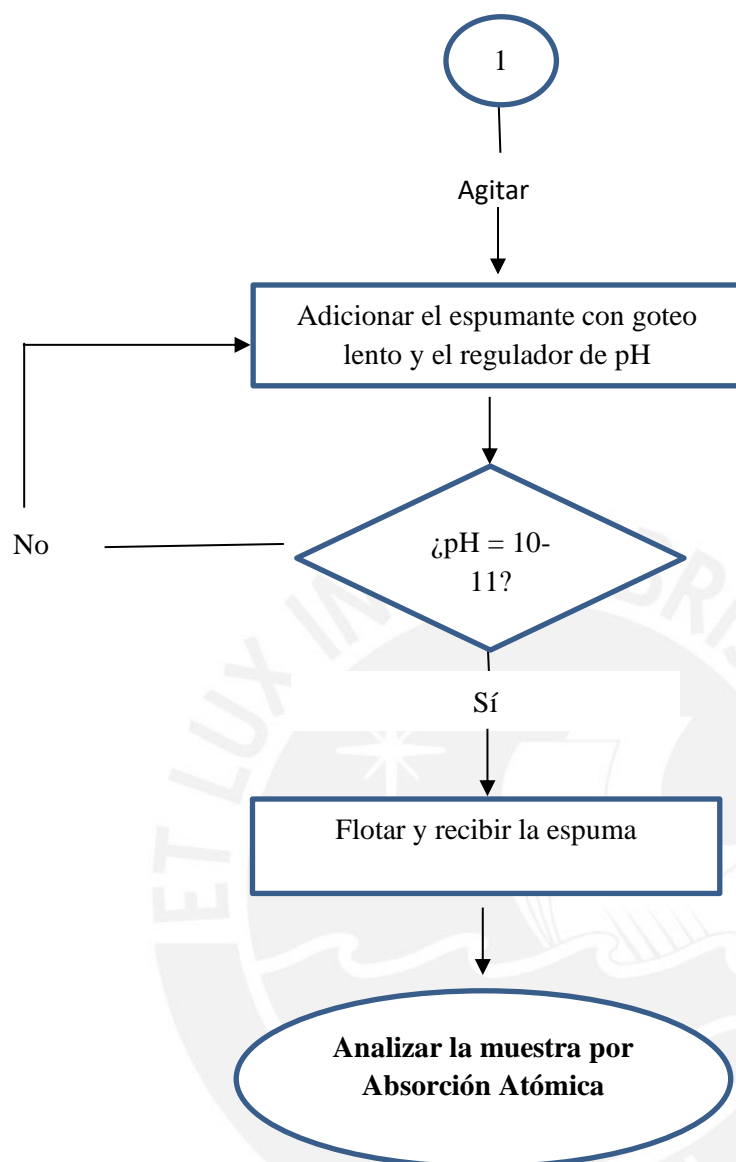
- (30) Ata, S., Jameson, G.J., The formation of bubble clusters in flotation cells. *Int. J. Miner. Process. International Journal Mineral Processing*, (2005), 123–139.
- (31) Vieira, A.M., Peres, A.E.C., The effect of amine type, pH, and size range in the flotation of quartz. *Minerals Engineering*, (2007), 1008–1013.
- (32) PJ Dunn, JD Hayler, GR Humphrey, Key green chemistry research areas a perspective from pharmaceutical manufacturers. *Journal Green Chemistry*, (2005), 2-4.
- (33) Anastas P.; Warner J. *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford University Press. New York, 1 (1998) 25-28.
- (34) Namainsa, Prevención de Residuos Industriales: Posibilidades de Actuación. Namaisa I Jornada de Prevención de Residuos en Navarra, (2009), 2-8.
- (35) Jering, A. and Gunther, Use of Renewable Raw Materials. *STARCH Biosynthesis Nutrition Biomedical*, (2010), 2-3
- (36) McLaren, J. and Faulkner, The technology roadmap for plant/crop-based renewable. OSTIGOV U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, (2010), 5-6.
- (37) OHSAS 18001 Seguridad y salud ocupacional, Actualización 2018, 12-15
- (38) S.M. BULATOVIC, Use of organic polymers in the flotation of polymetallic ores: A review. *Minerals Engineering*, Vol. 12 Pergamon (1999), 4-10
- (39) Maria Sinche-Gonzalez, Daniel Fornasiero, and Massimiliano Zanin, Flotation of Chalcopyrite and Molybdenite in the Presence of Organics in Water. *Minerals MDPI*, (2016), 1-7
- (40) P.F.A. Braga, b, A.P. Chaves, A.B. Luz, and S.C.A França, Polymeric Depressants in Purification by Flotation of Molybdenite. *IMPC 2014 Santiago de Chile*, (2014), 2-8

- (41) Cea Rosanna Ginocchio, Marchant Miguel Nicolás Herrera, Agente colector y espumante para flotación a base de residuos orgánicos para la recuperación de metales a partir de minerales por flotación espumosa, proceso de obtención del agente colector y espumante de flotación y proceso de flotación espumosa que usa el agente colector y espumante, Patentes Google (2011), 8-10
- (42) Siodmiak, T.; Piotr, M.; Proszowska, A. Ionic Liquids: A New Strategy in Pharmaceutical Synthesis. Mini-Reviews in Organic Chemistry. Mini reviews in Organic Chemistry, 9 (2012) 203-208.
- (43) David J. C. Constable, Alan D. Curzons and Virginia L. Cunningham, Metrics to 'green' chemistry – which are best?. Journal Green Chemistry, (2002), 1-6.
- (44) Alexei A. Lapkin, Metrics of Green Chemistry and Sustainability: Past, Present, and Future. ACS Publications, (2002), 8-19.
- (45) Ruiz Mercado GJ, Smith RL, and Gonzalez, MA, Sustainability Indicators for Chemical Processes: II. ACS Publications, (2012), 2329-2353.
- (46) Fabio Perez Goncalves, Santiago Fransisco Yunes, Renata Isabelle Huita, Carlos Alberto Marques, La dimensión ambiental de la experimentación en la enseñanza de la química: consideraciones sobre el uso de la métrica holística «estrella verde». Educación Química, 28 (2017) 99-106.
- (47) Ribeiro, M.; Costa, D.; Machado, A. "Green Star": a holistic Green Chemistry metric for evaluation of teaching laboratory experiments. Green Chemistry Letters and Reviews, 3 (2010) 149-159.
- (48) Rita, D.; Gabriela, T.; Ribeiro, M.; Adélico, A.; Machado, A. Using Green Star Metrics To Optimize the Greenness of Literature Protocols for Syntheses. J.Chem. Educ., 92 (2015) 1024-1034.

12.ANEXOS

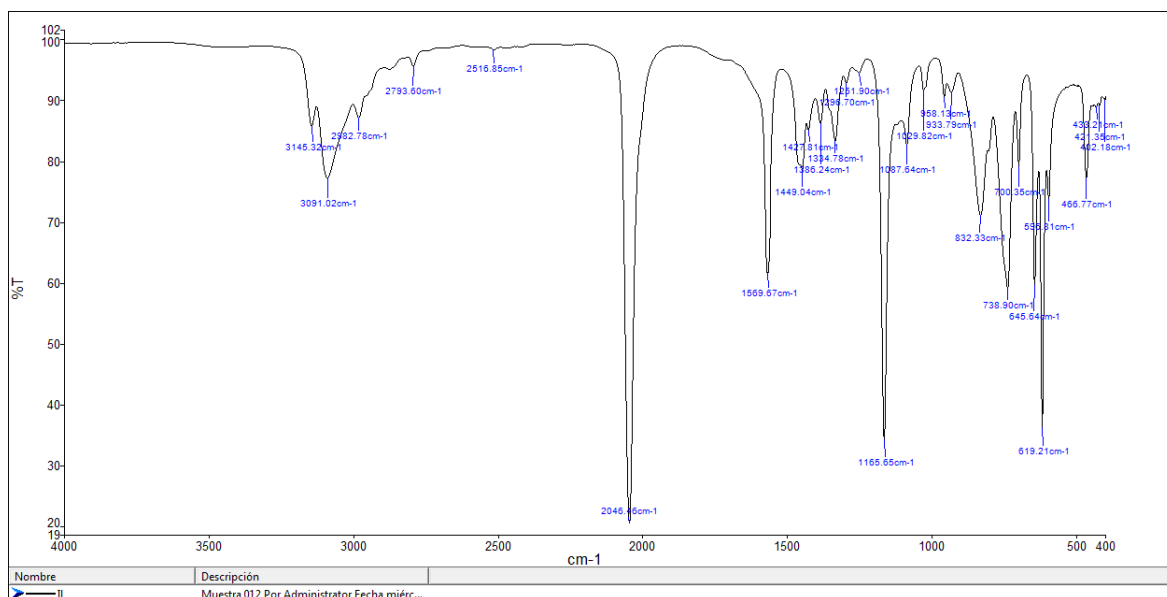
Anexo 1. Diagrama de flujo de la Microflotación verde



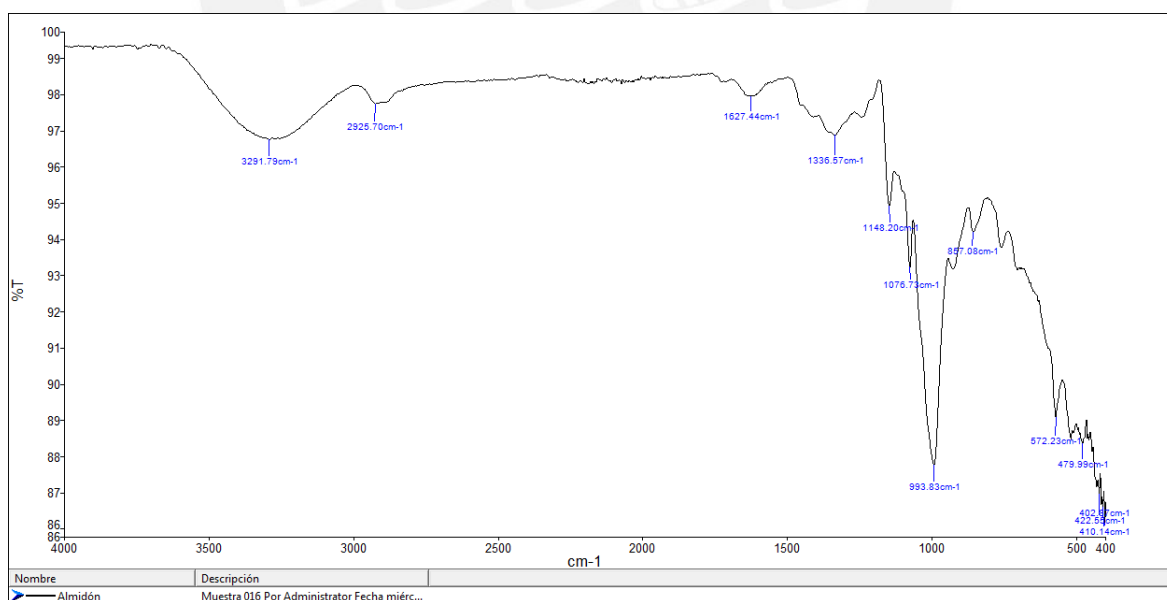


COLECTORES

Anexo 2. Espectro FT-IR experimental del 1-etil-3-metilimidazolio

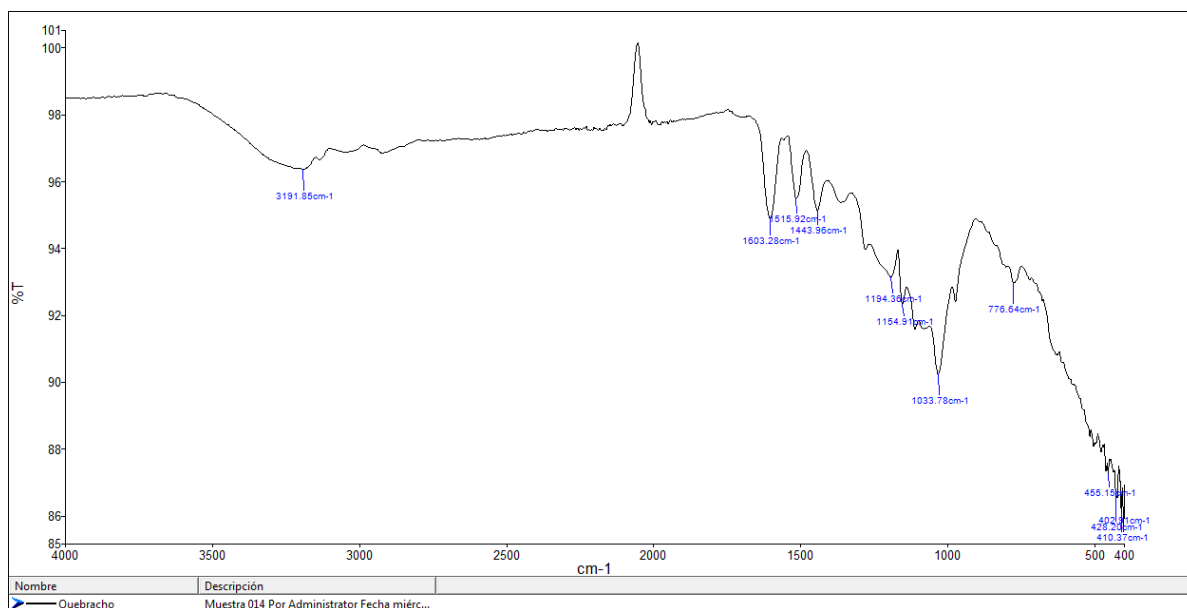


Anexo 3. Espectro FT - IR experimental del almidón soluble

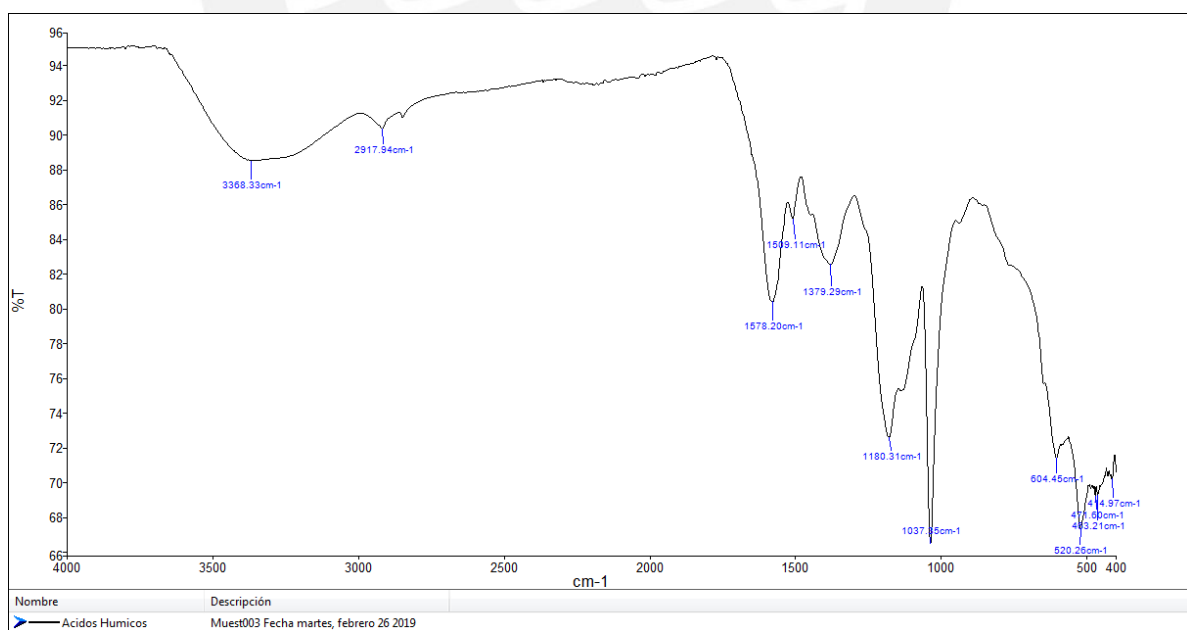


DEPRESORES

Anexo 4. Espectro FT-IR experimental del quebracho



Anexo 5. Espectro FT - IR experimental de los ácidos húmicos



Anexo 6. Espectro FT - IR experimental del peróxido de hidrógeno

